



Biocombustibles líquidos:
institucionalidad y formulación de políticas
públicas

Agustín Torroba

Biocombustibles líquidos:
institucionalidad y formulación de políticas
públicas

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), 2021



Biocombustibles líquidos: Institucionalidad y formulación de políticas públicas por IICA se encuentra bajo una Licencia Creative Commons Reconocimiento-Compartir igual 3.0 IGO (CC-BY-SA 3.0 IGO) (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/igo/>) Creado a partir de la obra en www.iica.int.

El Instituto promueve el uso justo de este documento. Se solicita que sea citado apropiadamente cuando corresponda.

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

Coordinación editorial: Agustín Torroba y Andrea Carvalho

Autor: Agustín Torroba

Corrección de estilo: Olga Vargas

Diagramación: María Fernanda Sequeira

Diseño de portada: María Fernanda Sequeira

Biocombustibles líquidos: Institucionalidad y formulación de políticas públicas / Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. – San José, Costa Rica: IICA, 2021.

113 p.; 21,5 cm X 28 cm.

ISBN: 978-92-9248-911-3

1. Biocarburante 2. Políticas públicas 3. Bioenergía 4. Combustibles líquidos 5. Transporte por carretera 6. Transporte aéreo 7. Transporte por agua 8. Combustibles fósiles 9. Biodiesel I. IICA II. Título

AGRIS

DEWEY

P06

333.793 8

Contenido

Introducción	7
Capítulo 1. La crisis climática y los biocombustibles como transición limpia.	8
La situación climática y sus distintos escenarios.	8
Cambios en el transporte y rol de los biocombustibles líquidos.	11
Capítulo 2. Introducción a los biocombustibles y los combustibles fósiles.	24
Aspectos generales.	24
Biocombustibles en el transporte terrestre.	26
Otros biocombustibles utilizados en la aviación y la navegación.	33
Capítulo 3. La institucionalidad de los biocombustibles.	49
a) Mapa de actores.	49
b) Temáticas claves por normar: la creación de mercados y normas asociadas.	52
c) Fundamentos para el establecimiento de políticas de biocombustibles.	60
Capítulo 4. Situación actual de los biocombustibles: panorama general y estudios de casos.	66
Situación actual y evolución reciente en el mundo.	66
Perspectivas.	72
Estudios de casos.	76
Conclusiones	101

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Cambio en la temperatura media global en superficie (con respecto al período 1986-2005).	9
Ilustración 2. Emisiones porcentuales de CO ₂ equivalente por sector.	12
Ilustración 3. Porcentaje de consumo total de energía por sector en 2018.	13
Ilustración 4. Matriz mundial de generación de electricidad en 2018.	14
Ilustración 5. Porcentaje de vehículos eléctricos en el escenario de desarrollo sostenible durante el período 2010-2030.	15
Ilustración 6. Esquemas transitorios de movilidad y posibles nuevos paradigmas.	16
Ilustración 7. Emisiones porcentuales de CO ₂ del sector del transporte en 2018.	17
Ilustración 8. Uso de energía renovable en el transporte durante el período 2018-2024.	18
Ilustración 9. Productos y subproductos derivados del craqueo de la biomasa y el petróleo.	25
Ilustración 10. Producción porcentual de biodiésel en 2019 de acuerdo con el origen de la materia prima.	27
Ilustración 11. Producción de biodiésel y sus subproductos a base de aceites vegetales	27
Ilustración 12. Producción porcentual de bioetanol en 2019 según la materia prima.	29
Ilustración 13. Esquema de producción de azúcar, bioetanol y subproductos a base de caña de azúcar.	30
Ilustración 14. Esquema de producción de bioetanol y subproductos a partir de maíz.	31
Ilustración 15. Esquema de producción de bioetanol a base de material lignocelulósico.	32
Ilustración 16. Consumo de combustibles sostenibles en la aviación según el Escenario de Desarrollo Sostenible 2025-2040.	34
Ilustración 17. Materias primas y rutas tecnológicas dirigidas a la producción de biocombustibles para aviación.	39
Ilustración 18. Ruta general de la OMI para lograr los objetivos de reducción de emisiones de GEI.	41
Ilustración 19. Tipos de países en relación con su potencial de desarrollo de biocombustibles.	63
Ilustración 20. Oferta energética mundial en 2018.	66
Ilustración 21. Oferta energética de América del Sur y América Central en 2018.	67
Ilustración 22. Participación de los biocombustibles en la matriz de combustibles líquidos en 2019.	67
Ilustración 23. Variación interanual porcentual, tendencia y producción total (en miles de m ³)	68
Ilustración 24. Evolución del consumo total (en miles de m ³) de biodiésel y su mezcla en diésel en el mundo.	69
Ilustración 25. Evolución del consumo total (en miles de m ³) de bioetanol y su mezcla en gasolina en el mundo.	69

Ilustración 26. Mandatos directos e indirectos seleccionados de uso del bioetanol en la gasolina.	70
Ilustración 27. Mandatos directos e indirectos de uso de biodiésel en el diésel fósil en 2019.	71
Ilustración 28. Evolución de la producción de biocombustibles líquidos (millones de m ³) bajo diferentes escenarios energéticos de IRENA.	73
Ilustración 29. Posible evolución del consumo de biocombustibles líquidos (en millones de m ³), de acuerdo con el escenario de cero emisiones netas en 2050 de la AIE.	73
Ilustración 30. Evolución de la producción mundial de biocombustibles 2019-2030 en comparación con el consumo en el escenario de desarrollo sostenible (en millones de tep).	74
Ilustración 31. Desglose del consumo de biocombustibles en el escenario de desarrollo sostenible (en millones de toneladas equivalentes de petróleo) durante el período 2015-2030.	74
Ilustración 32. Mandato de reducción de emisiones de GEI de la gasolina y el diésel.	87
Ilustración 33. Mezcla efectiva de biocombustibles en 2019.	87
Ilustración 34. Tasas impositivas aplicadas a los combustibles para el transporte en 2018.	91

Índice de tablas

Tabla 1. Vías de la ASTM aprobadas para la producción de SAF.	38
Tabla 2. Diferentes combustibles biológicos utilizables en el sector marítimo.	43
Tabla 3. Esquema de aplicación normativa en biocombustibles líquidos.	59
Tabla 4. Peso de los diferentes fundamentos en el establecimiento de políticas públicas de biocombustibles.	62
Tabla 5. Objetivos obligatorios en materia de biodiésel y bioetanol.	77
Tabla 6. Impuestos a las gasolinas y a sus mezclas con bioetanol en Tailandia.	81
Tabla 7. Impuestos al diésel y a sus mezclas con biodiésel en Tailandia.	82
Tabla 8. Tasas impositivas vigentes para los combustibles fósiles y los biocombustibles en Colombia.	85
Tabla 9. Principales aspectos de la política de biocombustibles de Indonesia, Malasia, Tailandia, Colombia, Suecia y Finlandia.	92
Tabla 10. Límites de especificación en el biodiésel: propósito, importancia y efectos de su desviación.	103
Tabla 11. Especificaciones técnicas para el bioetanol.	109

Introducción

La situación climática actual obliga a limitar el calentamiento global a un nivel inferior a 2 °C en relación con los niveles preindustriales, así como a seguir esforzándose por restringir este aumento de temperatura hasta 1.5 °C, para lo cual es imperioso reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). En tal sentido, como responsable del 14 % de estas, el sector del transporte desempeña un rol destacado en su reducción.

El mundo ha avanzado hacia nuevos paradigmas de movilidad (vehículos eléctricos, de hidrógeno, etc.) alternativos al actual, basado en la combustión interna; sin embargo, además de enfrentar dificultades propias de su desarrollo y un largo camino hasta su masificación, estos no podrán cubrir todos los sectores del transporte, ni expandirse a los sectores de la navegación ni la aviación.

Por consiguiente, los biocombustibles representan una opción más limpia en los actuales mecanismos de movilidad terrestre, ya que reducen las emisiones y mejoran la calidad del aire, así como en las nuevas tecnologías de movilidad, pues disminuirán las emisiones de GEI en el transporte marítimo y aéreo en los mediano y largo plazos.

En el primer capítulo del presente documento se analiza la situación climática actual y sus distintos escenarios futuros y se describe el rol de los biocombustibles en la descarbonización. En el segundo capítulo se examinan los biocombustibles líquidos más usados y aquellos con utilización potencial en los transportes marítimo y aéreo.

En el tercer capítulo se aborda el establecimiento de la institucionalidad relativa a los biocombustibles, comenzando con el análisis de los actores involucrados. Luego se revisan los temas clave para su normación y las distintas alternativas para avanzar en tal sentido. Finalmente, se estudian los tres pilares sobre los cuales se suelen establecer las políticas públicas en materia de biocombustibles líquidos.

El cuarto capítulo y final se divide en tres secciones: la primera, en la que se revisa la evolución reciente de los principales indicadores asociados a los biocombustibles líquidos, incluidos los efectos de la pandemia y las restricciones de movilidad durante 2020; la segunda sección, que se centra en las perspectivas; y la tercera, en la que se hace hincapié en algunos estudios de caso pertinentes para la formulación de políticas públicas.

Capítulo 1. La crisis climática y los biocombustibles como transición limpia

¿Cuál es la posición del mundo con respecto al cambio climático? ¿Cuáles son los desafíos que enfrentan la electromovilidad y otros paradigmas que pueden cambiar el transporte como lo conocemos actualmente? ¿Por qué son necesarios los biocombustibles en el paradigma de movilidad actual? Estas son algunas de las preguntas que motivan la discusión en el presente capítulo. Con un enfoque en la situación climática actual y en la influencia de los sistemas de movilidad en el cambio climático, se repasan los posibles cambios en los actuales medios de transporte y se describe el papel de los biocombustibles en dichos cambios y en la transición.

La situación climática y sus distintos escenarios

De acuerdo con el quinto informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático¹ (IPCC) (2014), intitulado *Climate change 2014*, la emisión continua de GEI conducirá a una situación de mayor calentamiento global, en la cual el crecimiento económico y demográfico siguen siendo los grandes propulsores de los aumentos en las emisiones de CO₂, derivadas en su mayoría de la quema de combustibles fósiles.

En caso de no reducir drásticamente la tendencia de incremento en las emisiones de GEI, la temperatura media aumentará de forma tal que se producirán cambios perdurables en todos los componentes del sistema climático, con una mayor probabilidad de ocurrencia de impactos de características irreversibles, graves y generalizadas en la población y los ecosistemas. Por esta razón resulta indispensable reducir en forma sustancial y sostenida dichas emisiones (mitigación) para que, junto con la aplicación de medidas de adaptación, se logren limitar los riesgos que supone el cambio climático.

En dicho informe el IPCC plantea cuatro escenarios basados en cuatro trayectorias de concentración representativas (RCP)² de las emisiones y las concentraciones atmosféricas de GEI, las emisiones de contaminantes atmosféricos y el uso del suelo en el siglo XXI, los cuales presentan un amplio margen de variación en función del desarrollo socioeconómico y la política climática. Estos son:

a) Escenario de mitigación: RCP 2.6³

En este escenario la temperatura global se mantiene a menos de 2 °C en relación con la de la era preindustrial. Se caracteriza por emisiones netas negativas sustanciales en 2100, con un promedio de 2 GtCO₂/año, con base en un secuestro de GEI mayor a su emisión. En 2100 el forzamiento radiativo⁴ llega a su máximo y luego comienza a disminuir.

¹El IPCC es el principal organismo internacional de evaluación del cambio climático y el “portavoz” científico autorizado de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) sobre dicho tema. Se trata de un grupo constituido por gobiernos que forman parte de la ONU o de la Organización Meteorológica Mundial.

²Las RCP son escenarios que abarcan series temporales de emisiones y concentraciones de toda la gama de GEI, aerosoles y gases químicamente activos, así como el uso del suelo y la cubierta terrestre.

³Trayectoria en la que el forzamiento radiativo alcanza su valor máximo a aproximadamente 3 W/m² antes de 2100 y luego disminuye (trayectoria de concentración ampliada en el supuesto de que las emisiones sean constantes después de 2100).

⁴El forzamiento radiativo es un cambio en el flujo de energía causado por un impulsor (sustancias y procesos naturales y antropógenos que alteran el balance energético de la Tierra) y calculado en la tropopausa (límite entre la troposfera y la estratosfera) o en la parte superior de la atmósfera. Se expresa en unidades de vatios por metro cuadrado (W/m²).

b) Escenario intermedio: RCP 4.5 ⁵

En este contexto, con un nivel de certeza medio, para finales del siglo XXI es más probable que el aumento de temperatura sea superior en 2° C al del período 1850-1900, lo que significa que en 2100 el forzamiento radiativo estaría estabilizado.

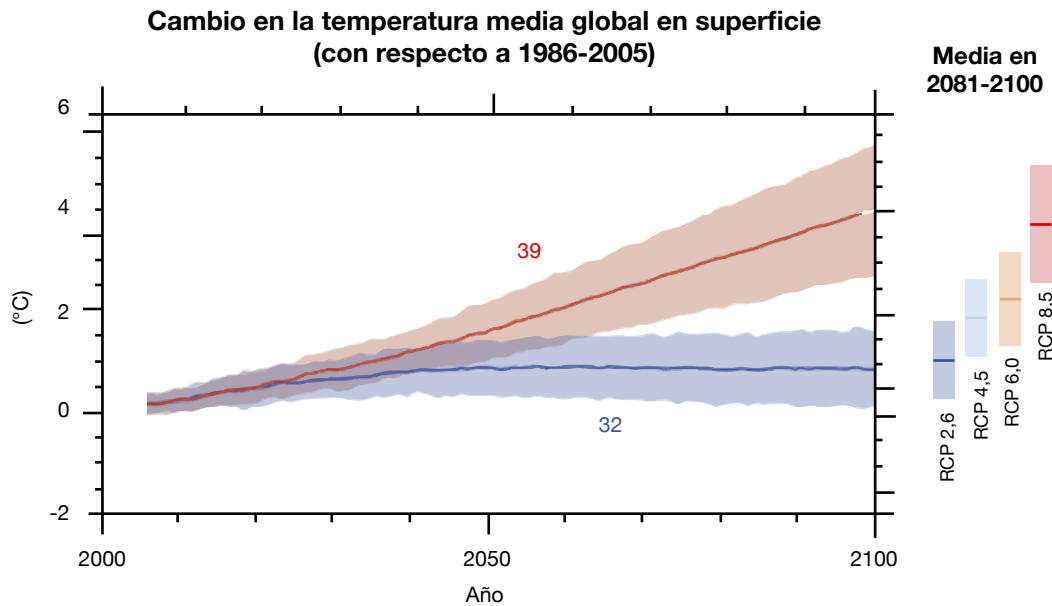
c) Escenario intermedio: RCP 6.0 ⁶

En este caso, durante ese mismo período, es muy probable que el incremento de la temperatura sea superior a 2°C, por lo que en 2100 el forzamiento radiativo no habría llegado a su máximo, como en el escenario RCP 8.5.

d) Escenario RCP 8.5 ⁷

En este escenario las emisiones de GEI se consideran altas. En relación con el aumento de temperatura previsto, se espera que la temperatura aumente más de 2 °C.

Ilustración 1. Cambio en la temperatura media global en superficie (con respecto al período 1986-2005).



Nota: Las series temporales de las previsiones y la medición de la incertidumbre (sombreado) se muestran en relación con los escenarios RCP 2.6 (azul) y RCP 8.5 (rojo). Las incertidumbres medias y asociadas, promediadas durante el período 2081-2100, figuran en todos los escenarios de RCP y se indican con barras verticales de colores en el margen derecho de cada gráfico.

Fuente: Tomado de IPCC 2014.

⁵El forzamiento radiativo se estabiliza a aproximadamente 4.5 W/m² después de 2100 (trayectoria de concentración ampliada en el supuesto de que las concentraciones sean constantes luego de 2150).

⁶El forzamiento radiativo se estabiliza a aproximadamente 6.0 W/m² después de 2100 (trayectoria de concentración ampliada en el supuesto de que las concentraciones sean constantes después de 2150).

⁷El forzamiento radiativo alcanza valores mayores a 8.5 W/m² en 2100 y sigue aumentando durante un período (trayectoria de concentración ampliada en el supuesto de que las emisiones sean constantes después de 2100 y las concentraciones sean constantes después de 2250).

Según las previsiones de todos los escenarios de emisiones evaluados, a lo largo del siglo XXI la temperatura de la superficie continuará en aumento, lo que después de 2100 seguirá ocurriendo en todos los escenarios, excepto en el de mitigación. Muchos aspectos del cambio climático y sus impactos asociados continuarán dándose durante siglos, incluso si se detienen las emisiones antropogénicas de GEI; sin embargo, las magnitudes de estos riesgos son diferentes y aumentan de acuerdo con el grado de calentamiento.

En el Acuerdo de París (ONU 2015) se establece la necesidad de limitar el calentamiento global a un nivel muy inferior a 2 °C en relación con los niveles preindustriales, así como de seguir esforzándose por restringir aún más este aumento de la temperatura a 1.5 °C (este mismo objetivo se establece en el informe especial elaborado por el IPCC en 2019). Para lograrlo, se requiere una rápida aplicación de los compromisos establecidos en el marco de dicho acuerdo.

De conformidad con estos informes, para alcanzar la estabilización de la temperatura a 1.5 °C con una probabilidad cercana al 50 %, las emisiones netas de dióxido de carbono deberán disminuir 45% en 2030 en comparación con los niveles de 2010 y alcanzar el cero neto en 2050. En el caso de la trayectoria de los 2 °C, se requeriría una reducción de 25 % en las emisiones mundiales en 2030 en relación con los niveles de 2010, así como alcanzar el cero neto en 2070.

En el informe elaborado en 2018 por el IPCC se establece el estrecho vínculo entre los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU y el cambio climático. En este sentido, si se logra limitar el aumento de temperatura a 1.5 °C, la evitación de los impactos del cambio climático en el desarrollo sostenible, la erradicación de la pobreza y la disminución de las desigualdades será mayor con respecto a escenarios de referencia con aumentos de temperatura de 2 °C.

En caso de que no se logre avanzar significativamente en la reducción de emisiones de GEI, se generarán los siguientes efectos asociados al cambio climático:

a) Se producirán eventos extremos como olas de calor, sequías, ciclones y episodios extremos de precipitaciones, con una ocurrencia y una duración mayores y con efectos indirectos, como un mayor número de incendios y brotes de enfermedades y plagas. El riesgo y la magnitud de dichos impactos conexos al clima varían según la región considerada.

b) Los sistemas costeros y las zonas bajas experimentarán con mayor frecuencia fenómenos de inundación y erosión, dada la elevación en el nivel del mar.

c) Se producirán impactos negativos en los procesos de producción de alimentos, el acceso a estos y la estabilidad de sus precios, lo que amenazará la seguridad alimentaria.

d) Habrá una pérdida de biodiversidad debido a los cambios generados en los ecosistemas terrestres y acuáticos.

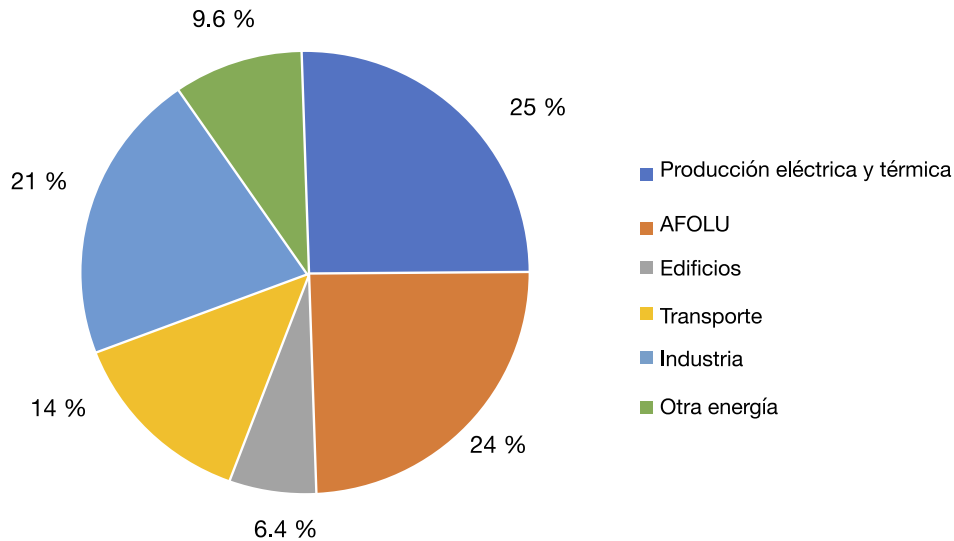
- e) Aumentará el número de personas que experimentan escasez de agua, por los cambios en los regímenes de precipitaciones o el derretimiento de nieve y hielo, que alteran los sistemas hidrológicos y afectan los recursos hídricos en términos de cantidad y calidad.
- f) En muchas regiones, especialmente en los países en desarrollo de bajos ingresos, se incrementarán los problemas de salud y la probabilidad de enfermedad y muerte debido a olas de calor e incendios. En las regiones pobres una inferior producción de alimentos aumentará la probabilidad de desnutrición. Además, aumentarán los riesgos de enfermedades transmitidas por los alimentos, el agua y vectores.
- g) Se incrementará la pobreza y la desigualdad, desarrollándose nuevos focos de pobreza. Las personas marginadas en los planos social, económico, cultural, político e institucional, entre otros, serán las más afectadas.
- h) Aumentarán de forma indirecta los riesgos de conflictos violentos por la crisis económica y el incremento en la pobreza.

Cambios en el transporte y rol de los biocombustibles líquidos

Para hacer frente a la crisis climática descrita, cada sector debe tomar medidas conducentes a reducir las emisiones de GEI. De acuerdo con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2021), el bienestar de los jóvenes de hoy y de las generaciones futuras depende de una ruptura urgente y clara de las tendencias actuales de deterioro del medio ambiente. Los próximos diez años son cruciales para reducir en 45 % las emisiones de dióxido de carbono, en comparación con los niveles de 2010, y alcanzar las cero emisiones netas en 2050, a fin de limitar el calentamiento a 1.5 °C, en consonancia con el Acuerdo de París, además de conservar y restaurar la biodiversidad y minimizar la contaminación y la generación de desechos.

De acuerdo con el IPCC, el 14 % de las emisiones de GEI proviene del sector del transporte⁸, muy asociado a los combustibles líquidos. En Latinoamérica, la mala calidad del aire afecta a más de 100 millones de habitantes de zonas urbanas.

Ilustración 2. Emisiones porcentuales de CO₂ equivalente por sector.



Nota: AFOLU significa emisiones generadas por la agricultura, la silvicultura y otros usos del suelo.

Fuente: Elaborado con base en IPCC 2014.

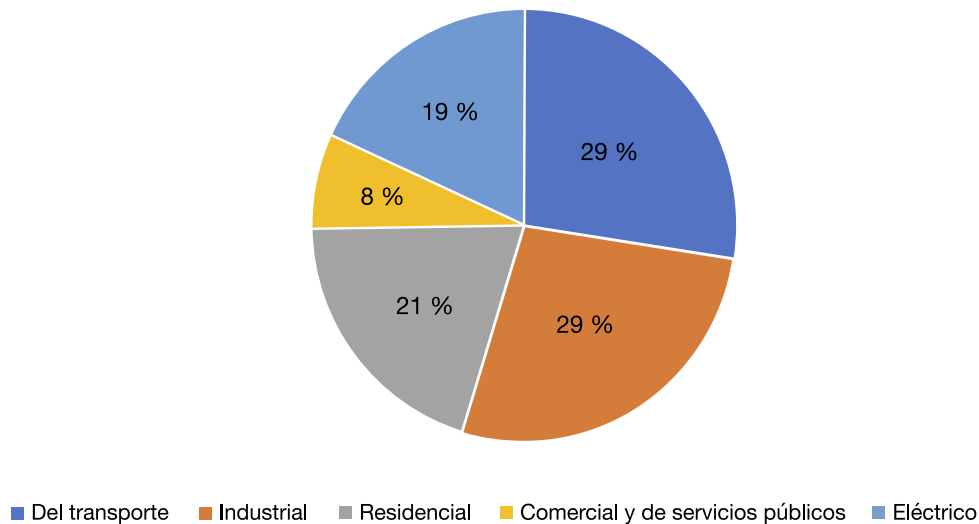
Para enfrentar la crisis climática, el mundo avanza hacia nuevos paradigmas de movilidad vehicular. En tal sentido, los vehículos eléctricos se encuentran a la cabeza en las ventas de unidades con tecnologías diferentes de la tradicional de combustión interna. Otros tipos de tecnologías, como la movilidad a partir de hidrógeno⁹, se están debatiendo como alternativas.

⁸ Asimismo, de acuerdo con la Agencia Internacional de la Energía (AIE) (2020b), el sector del transporte produce 25 % de las emisiones de CO₂ derivadas de la quema de combustibles en el mundo. En América del Sur y América Central este porcentaje se eleva a 40 %.

⁹ Resulta especialmente interesante la tecnología de celdas de combustible a hidrógeno, que utiliza bioetanol (100 % etanol o agua mezclada con etanol) como fuente de combustible para generar electricidad mediante celdas de combustible de óxido sólido (SOFC). El sistema funciona por medio de un reformador que produce hidrógeno a partir de bioetanol y una pila de SOFC que genera electricidad a partir de una reacción entre el hidrógeno y el oxígeno (aire) en la celda. La electricidad generada se almacena en la batería que suministra electricidad a un motor eléctrico para impulsar el vehículo. El calor producido durante la generación de energía se reutiliza en la producción de hidrógeno. Esta tecnología permite integrar los biocombustibles en una nueva tecnología de movilidad, que incluye al hidrógeno como vector eléctrico.

No obstante, el cambio de paradigma de una movilidad vehicular basada en la combustión interna a un modelo fundamentado en la electromovilidad enfrenta varios desafíos. En primer lugar, la electricidad representa el 19 % de la energía total consumida en el mundo, mientras que el sector del transporte, el 29 %, lo que significa que una masificación de la electromovilidad puede saturar el sistema eléctrico, lo que implicaría una importante ampliación y, por consiguiente, una inversión en los sectores de generación, transporte y distribución eléctrica.

Ilustración 3. Porcentaje de consumo total de energía por sector en 2018.



Fuente: Elaborado con base en AIE 2019.

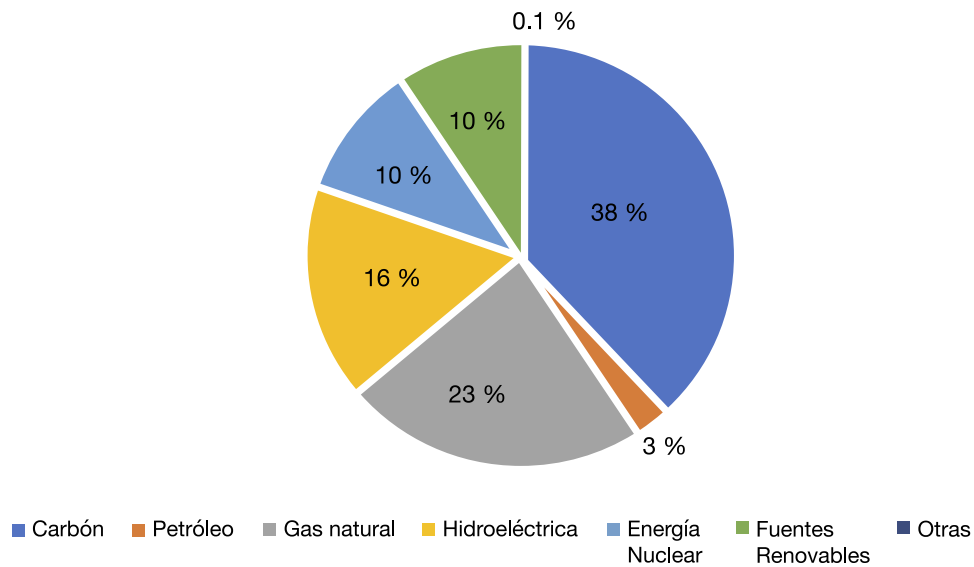
En segundo lugar, la reducción de emisiones de CO₂ en el sector del transporte a través de la movilidad eléctrica implica modificar su matriz para realizar un uso más intensivo de las energías renovables.

El 64 % de la electricidad producida en el mundo proviene de fuentes fósiles. De los fósiles, el carbón es la fuente de energía más contaminante y la más utilizada en la generación de electrones, ya que representa el 38 % del total mundial.

Si la electromovilidad es provista por matrices eléctricas que utilizan fuentes fósiles en forma intensiva, se corre el riesgo de que esta resulte aún más contaminante que los actuales medios de transporte de combustión interna. En la actualidad la matriz mundial de energía renovable genera 10 % de la energía. Si a esta se le suma la generación hidroeléctrica (16 % del total), dicha suma aún se encuentra por debajo del porcentaje de energía producida con carbón. La evolución de la participación de las energías renovables será fundamental para reducir la huella de carbono de la electromovilidad¹⁰.

¹⁰Además, se deben analizar las matrices eléctricas por países, a fin de avanzar hacia estrategias acertadas de descarbonización.

Ilustración 4. Matriz mundial de generación de electricidad en 2018.



Fuente: Elaborado con base en AIE 2020a.

Un tercer desafío es desarrollar una red de abastecimiento de carga, especialmente de automóviles eléctricos. Las ventas de estos automóviles son bajas con respecto a las de los demás vehículos, lo que desincentiva la instalación masiva de redes de abastecimiento, mientras que lo reducido de estas redes disuade de la compra de vehículos eléctricos.

La intermitencia en la generación de energías renovables y la búsqueda de la eficiencia energética supondrán adaptar los sistemas eléctricos para que sean más flexibles, a fin de que puedan responder a la variabilidad de la oferta y la demanda. Para ello, será vital una correcta gestión de las energías renovables, mediante la introducción de nuevas formas de almacenamiento de electricidad, redes inteligentes y sistemas de medición bidireccionales.

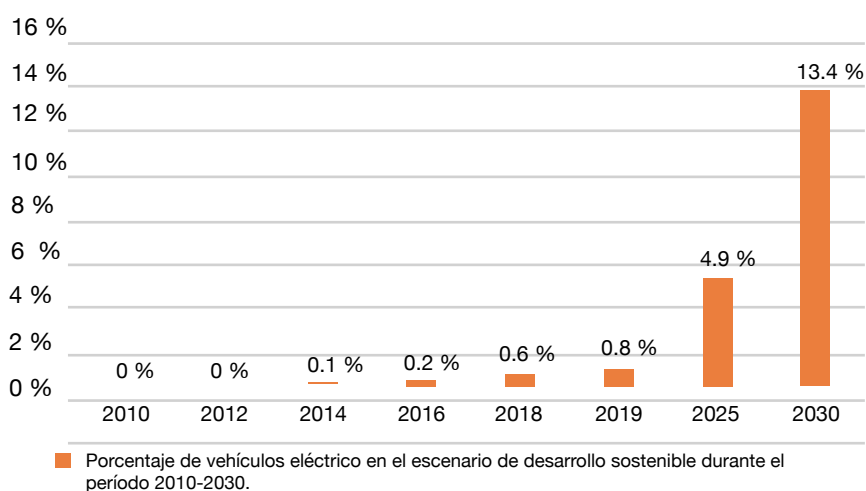
Asimismo, se deben reducir los costos de los vehículos eléctricos, que son mucho más caros que los convencionales, y avanzar en la reutilización de los equipos que emplean energías fósiles¹¹.

¹¹Los biocombustibles líquidos permiten reutilizar casi todos los vehículos de combustión; sin embargo, con los eléctricos y de hidrógeno, esto se logra de manera parcial.

La masificación de un nuevo paradigma de movilidad alternativo toma tiempo¹², del que no se dispone por la inmediatez de las exigencias medioambientales. Por ello, se debe realizar una transición medioambientalmente más sostenible.

A pesar de un rápido crecimiento en las ventas de automóviles eléctricos durante la última década, los automóviles eléctricos representan aproximadamente el 1 % de la flota mundial de automóviles en la actualidad. En el escenario de desarrollo sostenible¹³ de la AIE (2020c), el 13 % de la flota mundial de automóviles será eléctrica para 2030, lo que requiere un fuerte crecimiento promedio anual del 36% por año entre 2019 y 2030. Este es considerado el escenario más agresivo de introducción de la electromovilidad, mientras que en el escenario de políticas establecidas actuales, se estima que solo el 7 % de la flota será eléctrica en 2030.

Ilustración 5. Porcentaje de vehículos eléctricos en el escenario de desarrollo sostenible durante el período 2010-2030.



Fuente: Elaborado con base en AIE 2020e.

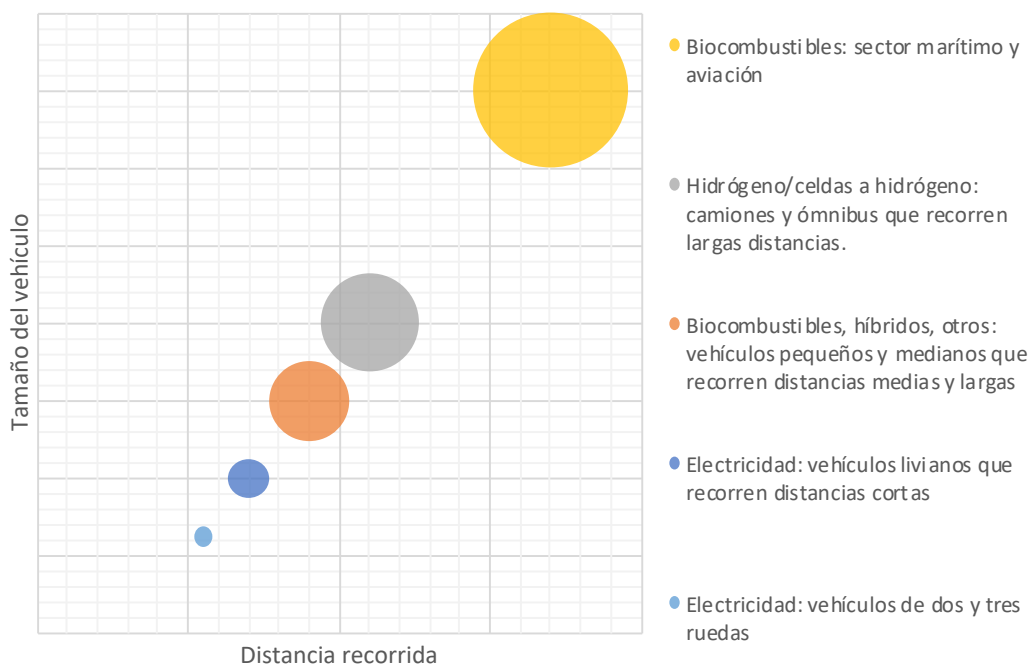
¹²De acuerdo con la Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA, 2020), el transporte a partir de los biocombustibles será indispensable para descarbonizar la economía. Este se volverá mucho más electrificado, pero no en todas partes, ni en todos los sectores a la vez, debido a lo cual la renovación de las flotas vehiculares tardará al menos dos décadas, durante las cuales habrá una gran demanda de biocombustibles. Aunque los vehículos eléctricos llegarán a dominar las flotas de vehículos ligeros y a alimentarse cada vez más de electricidad renovable, solo pueden ingresar en los mercados con redes eléctricas e infraestructura de carga bien desarrolladas. Por otra parte, debido a que requieren una mayor densidad de energía, es poco probable que los camiones pesados de carga de larga distancia, los barcos y los aviones se electrifiquen completamente. Por ello, todas las formas de biocombustibles se deben extender aún más como una solución climática inmediata.

¹³El escenario de desarrollo sostenible de la AIE establece una visión ambiciosa y pragmática de cómo el sector energético global puede evolucionar para cumplir los ODS críticos relacionados con la energía. Comienza con los resultados de los ODS y luego establece los requerimientos para lograr estos objetivos de una manera realista y rentable. Además, este escenario está alineado con el Acuerdo de París, que tiene la finalidad de “Mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales” (ONU 2015). Este escenario de desarrollo sostenible mantiene el aumento de temperatura por debajo de 1.8 °C, con una probabilidad del 66 %, sin depender de las emisiones globales netas de CO₂, lo que equivale a limitar el aumento de temperatura a 1.65 °C con una probabilidad del 50 %. Las emisiones globales de CO₂ del sector energético y los procesos industriales disminuirán de 35 800 millones de toneladas en 2019 a menos de 10 000 millones de toneladas en 2050 y se estará en camino de alcanzar las cero emisiones netas en 2070.

Asimismo, algunas innovaciones de movilidad representan una mejora en términos de emisiones y calidad del aire, pero no llegan a romper con el paradigma actual, entre ellas, los vehículos híbridos, los híbridos enchufables y los vehículos que funcionan con gas natural comprimido (GNC), gas natural licuado (GNL) y biocombustibles.

Es probable que, con el tiempo, los cambios en el paradigma de movilidad convivan con las actuales formas de movilidad y transiciones más limpias. La electromovilidad tendría una mejor inserción en vehículos pequeños que recorren distancias cortas, así como en los de dos y tres ruedas, lo que permitiría resolver parcialmente las cuestiones asociadas a la logística de carga y a la duración de las baterías. Los vehículos de celda de combustible de hidrógeno tendrían un mayor grado de penetración en vehículos pesados (camiones y buses), mientras que las transiciones limpias (biocombustibles, híbridos, GNC, etc.) lo presentarían en los autos de pasajeros de tamaño y distancias medias.

Ilustración 6. Esquemas transitorios de movilidad y posibles nuevos paradigmas.

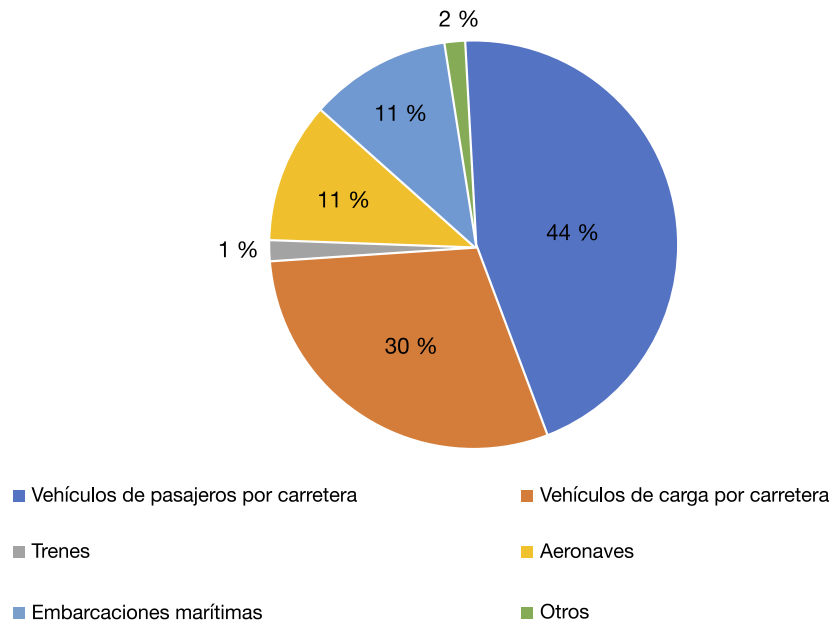


Entre estas alternativas se destaca el uso de los biocombustibles líquidos. En la actualidad estos forman parte de una transición más limpia en el paradigma de movilidad basada en combustión interna¹⁴. Además de constituir alternativas de movilidad ambientalmente más sostenibles que los combustibles fósiles, los biocombustibles permiten una movilidad más limpia sin grandes cambios técnicos. Adicionalmente, revisten interés por contribuir a diversificar la matriz energética y producir un impacto positivo en el desarrollo territorial y la agricultura familiar por medio de una demanda más estable de materias primas y la generación de empleo y valor agregado (Torroba 2020a).

¹⁴Se debe evitar el uso de suelos con un alto contenido de carbono en cultivos para producir biocombustibles. Según el IPCC (2018), cuando estas tierras (bosques) se destinan a dichos cultivos, se puede tardar varias décadas (y hasta siglos) en recuperar las emisiones netas derivadas del cambio del uso de suelo.

El consumo de derivados petroleros destinado a vehículos de pasajeros y de carga por carretera es el responsable del 74 % de las emisiones de CO₂ del sector del transporte; en estos segmentos el biodiésel y el bioetanol pueden contribuir a reducirlas. Los sectores marítimo y de la aviación generan el 22 % en las emisiones de CO₂.

Ilustración 7. Emisiones porcentuales de CO₂ del sector del transporte en 2018.



Fuente: Elaborado con base en AIE 2020f.

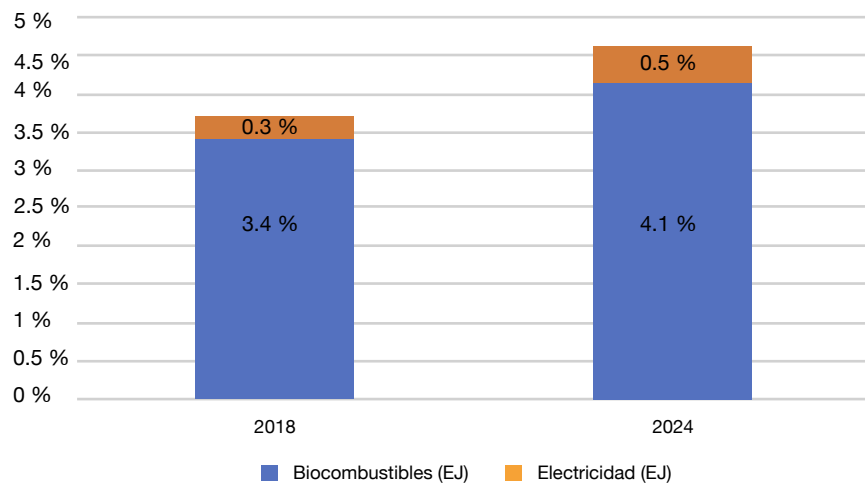
Como se describirá en el capítulo 2, los biocombustibles sostenibles para la aviación son una de las grandes apuestas de este sector para reducir las emisiones, ya que un cambio a paradigmas tecnológicos alternativos a la movilidad aérea actual está distante. De acuerdo con la AIE (2020d), debido a la falta de mecanismos políticos, en 2019 en el transporte marítimo internacional prácticamente no se utilizaron combustibles bajos en carbono.

Con solo el 0.1 % del consumo final de energía, los biocombustibles son la única alternativa no fósil que se ha adoptado hasta ahora y, según el marco normativo actual, se prevé que los combustibles de bajo y cero carbono representarán casi el 3 % del consumo total de energía en el transporte marítimo internacional en 2030 y aproximadamente un tercio en 2050.

La producción y el consumo de biocombustibles líquidos han tenido un destacado crecimiento en los últimos 20 años. En particular, entre 2000 y 2019 la producción de biodiésel y bioetanol, en forma conjunta, creció 928 %. En la última década, la producción de biodiésel muestra un aumento acumulado del 140 %, mientras que el bioetanol, desde un valor base más elevado, creció 31 % (Torroba 2020b). En el capítulo 4 se describe la evolución reciente de los biocombustibles líquidos, incluido el destinado al transporte marítimo y aeronáutico.

En cuanto a la energía renovable utilizada en el transporte (que incluye los combustibles biológicos y la electricidad), los biocombustibles representaron el 93 % de ella. En un escenario de gran crecimiento de la movilidad eléctrica, se espera que en 2024 los biocombustibles todavía superen el 90 % de la cuota de energía renovable en el transporte.

Ilustración 8. Uso de energía renovable en el transporte durante el período 2018-2024.



Fuente: Elaborado con base en AIE 2019.

Como se verá en el capítulo 3, el crecimiento en el uso de los biocombustibles líquidos está en sintonía con la formulación de políticas públicas ad hoc en los distintos países del mundo.

Además de mostrar contundentes reducciones de GEI, la buena planificación en el uso de biocombustibles puede mejorar la calidad del aire, especialmente en zonas de alta densidad urbana¹⁵.

Este último punto cobra especial relevancia en recientes estudios que muestran la relación entre muertes prematuras y mayores índices de mortalidad asociados a la COVID-19 con polución derivada de la quema de combustibles fósiles. En tal sentido, Conticini *et al.* (2020) señalan que el alto grado de polución en el norte de Italia debe ser considerado un cofactor del elevado nivel de letalidad (en referencia a la COVID-19) registrado en dicha área. En forma adicional, Wu *et al.* (2020) encontraron evidencias de que el incremento de partículas PM 2.5¹⁶ está asociada a un aumento en la tasa de letalidad de la COVID-19. Estos estudios vinculan la mala calidad del aire a un incremento en la letalidad de la COVID-19, lo que los tomadores de decisiones deben tener en cuenta¹⁷.

¹⁵Para obtener más información al respecto, consúltense:

- Aikawa, K; Jetter, JJ. 2013. Impact of gasoline composition on particulate matter emissions from a direct-injection gasoline engine: applicability of the particulate matter index. *International Journal of Engine Research* 15(3):298-306.
- Jin, D; Choi, K; Myung, CL; Lim, Y; Lee, Y; Park, S. 2017. The impact of various ethanol-gasoline blends on particulates and unregulated gaseous emissions characteristics from a spark ignition direct injection (SID) passenger vehicle fuel (en línea). Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236117310487>
- Martini, G; Astorga, C; Adam, T; Farfaletti, A; Manfredi, U; Montero, L; Krasenbrink, A; Larsen, B; De Santi, G. 2009. Effect of fuel ethanol content on exhaust emissions of a flexible fuel vehicle (en línea). JRC. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC54345>.
- Storey, JM; Barone, T; Norman, K; Lewis, S. 2010. Ethanol blend effects on direct injection spark-ignition gasoline vehicle particulate matter emissions. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants* 3(2):650-659.

¹⁶Las partículas PM 2.5e tienen un diámetro menor a 2.5 µm (más de 100 veces más delgadas que un cabello humano) y permanecen suspendidas por más tiempo. Se derivan en gran medida de la quema de combustibles fósiles.

¹⁷ Otros estudios, como el del National Biodiesel Board (2021), han demostrado que, en el ámbito local, reemplazar el uso de gasoil derivado de petróleo por biodiésel resulta muy conveniente, ya que brinda importantes beneficios para la salud como un menor riesgo de contraer cáncer, menos muertes prematuras y menos ataques de asma. Dicho estudio está disponible en el siguiente enlace: https://www.biodiesel.org/docs/default-source/trinity-study/trinity-nbb-transportation-health-risks-review-v1-03.pdf?sfvrsn=ec0f774a_2.

Finalmente, Vohra *et al.* (2021) estiman que un total de 10.2 millones de muertes prematuras son atribuibles a las partículas fósiles PM2.5. En tal sentido, la reducción de material particulado y la mejora en la calidad del aire al reemplazar combustibles fósiles por biocombustibles se convierte en un elemento adicional a la hora de evaluar su uso.

Hay que destacar que las fuentes de energía fósiles, los biocombustibles y otras fuentes renovables conviven en un mercado donde las señales de precios –como asignadores de recursos actuales e indicadores de escaseces futuras– se tornan cruciales. Aunque el mercado de las energías fósiles está establecido y funciona –aún con distorsiones–, respondiendo a las señales de precios, en el caso de las bioenergías, dichas señales aún son difusas e imperfectas en su función de “crear” y “establecer las rutinas de funcionamiento” del mercado. La transición de un modelo a otro no es automática, sin costo ni tensiones, por lo que necesariamente tendrá la impronta de cada sociedad en particular y, en todos los casos, un fuerte peso de la inercia institucional previa y de las futuras intervenciones estatales (Bisang y Torroba 2020). El establecimiento de mecanismos que permitan “internalizar” algunas de las externalidades negativas, especialmente las ambientales (como el impuesto al CO₂), resultarán cruciales para la formulación de señales de precio y articulación de mercados de biocombustibles.

Ideas destacadas

1. La situación climática actual supone la necesidad de limitar el calentamiento global a un nivel muy inferior a 2 °C con respecto a los niveles preindustriales y de seguir esforzándose por limitar aún más este aumento de la temperatura a 1.5 °C (este mismo objetivo se establece en el informe especial elaborado por el IPCC en 2018). Para lograrlo, se requiere un rápido cumplimiento de los compromisos establecidos en el Acuerdo de París.

En caso de no lograrse el punto anterior, se generarán impactos negativos en el medio ambiente que afectarán el cumplimiento de los ODS, en general, y de los objetivos de desarrollo sostenible, erradicación de la pobreza y disminución de las desigualdades, en particular.

2. El sector del transporte tiene un rol destacado en la reducción de las emisiones de GEI, ya que produce el 14 % de ellas. Además, genera el 25 % de las emisiones de CO₂ derivadas de la quema de combustibles en el mundo y el 40 % en Sudamérica y Centroamérica.
3. Para reducir las emisiones del sector y mejorar la calidad del aire el mundo está avanzando hacia nuevos paradigmas de movilidad vehicular, como la electromovilidad y el hidrógeno. Si se masifica, este tipo de movilidad enfrentará varios desafíos: i) generar una matriz eléctrica más verde y mejorar la eficiencia energética para reducir las emisiones; ii) aumentar la generación, el transporte y la distribución de electricidad; iii) establecer redes de distribución alternativa; y iv) reducir los costos. Considerando dichos desafíos y el desarrollo actual, una modificación sustancial en el paradigma actual de movilidad tardará mucho tiempo en materializarse.
4. Los biocombustibles producen una transición más limpia en los mecanismos de movilidad actuales, reduciendo las emisiones y mejorando la calidad del aire.
5. Como transición limpia, los biocombustibles se afianzarán en el transporte actual de carga y pasajeros por carretera (bioetanol y biodiésel) y formarán parte de la movilidad aérea (biocombustibles para la aviación) y marítima (biocombustibles marítimos).

Bibliografía consultada

- AIE (Agencia Internacional de la Energía, Francia). 2019. Energy transitions indicators (en línea). París. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://www.iea.org/reports/energy-transitions-indicators>.
- AIE (Agencia Internacional de la Energía, Francia). 2020a. Electricity information (en línea). París. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://www.iea.org/subscribe-to-data-services/electricity-statistics>.
- AIE (Agencia Internacional de la Energía, Francia). 2020b. CO2 emissions from fuel combustion (en línea). Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://www.iea.org/subscribe-to-data-services/co2-emissions-statistics>.
- AIE (Agencia Internacional de la Energía, Francia). 2020c. World energy model (en línea). París. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en https://iea.blob.core.windows.net/assets/bc-4936dc-73f1-47c3-8064-0784ae6f85a3/WEM_Documentation_WEO2020.pdf.
- AIE (Agencia Internacional de la Energía, Francia). 2020d. International shipping (en línea). París. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://www.iea.org/reports/international-shipping>.
- AIE (Agencia Internacional de la Energía, Francia). 2020e. Electric vehicles (en línea). París. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://www.iea.org/reports/electric-vehicles>.
- AIE (Agencia Internacional de la Energía, Francia). 2020f. Tracking transport (en línea). París. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://www.iea.org/topics/transport>.
- Aikawa, K; Jetter, JJ. 2013. Impact of gasoline composition on particulate matter emissions from a direct-injection gasoline engine: applicability of the particulate matter index. *International Journal of Engine Research* 15(3):298-306.
- Bisang, R; Torroba, A. 2020. Sistemas de precios y bioenergías (en línea). Buenos Aires, Argentina, IIEP-BAIRES. (Serie Documentos de Trabajo del IIEP, n.o 56). Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <http://iiep-baires.econ.uba.ar/uploads/publicaciones/525/archivos/1.pdf>.
- Conticini, E; Frediani, B; Caro, D. 2020. Can atmospheric pollution be considered a co-factor in extremely high level of SARS-CoV-2 lethality in Northern Italy? (en línea). *Environmental Pollution* 261. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114465>.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Suiza). 2018. Summary for policymakers (en línea). In Masson-Delmotte, V; Zhai, P; Pörtner, HO; Roberts, D; Skea, J; Shukla, PR; Pirani, A; Moufouma-Okia, W; Péan, C; Pidcock, R; Connors, S; Matthews, JBR; Chen, Y; Zhou, X; Gomis, MI; Lonnoy, E; Maycock, T; Tignor, M; Waterfield, T (eds.). *Global warming of 1.5°C: an*

IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development and efforts to eradicate poverty. Ginebra, Suiza, OMI. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_SPM_version_report_LR.pdf.

IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Suiza). 2014. Climate change 2014: synthesis report (en línea). Ginebra, Suiza. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf.

IRENA (Agencia Internacional de las Energías Renovables, Emiratos Árabes Unidos). 2020. Global renewables outlook: energy transformation 2050 (en línea). Abu Dabi. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Apr/IRENA_Global_Renewables_Outlook_2020.pdf.

Jin, D; Choi, K; Myung, CL; Lim, Y; Lee, Y; Park, S. 2017. The impact of various ethanol-gasoline blends on particulates and unregulated gaseous emissions characteristics from a spark ignition direct injection (SIDI) passenger vehicle fuel (en línea). Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236117310487>

Martini, G; Astorga, C; Adam, T; Farfaletti, A; Manfredi, U; Montero, L; Krasenbrink, A; Larsen, B; De Santi, G. 2009. Effect of fuel ethanol content on exhaust emissions of a flexible fuel vehicle (en línea). JRC. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC54345>.

NBB (National Biodiesel Board, Estados Unidos de América). 2021. Assessment of health benefits from using biodiesel as a transportation fuel (en línea). Trinity Consultants. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en https://www.biodiesel.org/docs/default-source/trinity-study/trinity-nbb-transportation-health-risks-review-v1-03.pdf?sfvrsn=ec0f774a_2.

ONU (Organización de las Naciones Unidas, Estados Unidos de América). 2015. Acuerdo de París (en línea). Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf.

PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Kenia). 2021. Hacer las paces con la naturaleza: un plan científico para abordar la triple emergencia del clima, la biodiversidad y la contaminación (en línea). Nairobi, Kenia. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://www.unep.org/resources/making-peace-nature>.

- Shukla, PR; Skea, J; Slade, R; van Diemen, R; Haughey, E; Malley, J; Pathak, M; Portugal Pereira, J (eds.). 2019. Technical summary (en línea). In Shukla, PR; Skea, J; Calvo Buendía, E; Masson-Delmotte, V; Pörtner, HO; Roberts, DC; Zhai, P; Slade, R; Connors, S; van Diemen, R; Ferrat, M; Haughey, E; Luz, S; Neogi, S; Pathak, M; Petzold, J; Portugal Pereira, J; Vyas, P; Huntley, E; Kissick, K; Belkacemi, M; Malley, J (eds.). Climate change and land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/07/03_Technical-Summary-TS_V2.pdf.
- Storey, JM; Barone, T; Norman, K; Lewis, S. 2010. Ethanol blend effects on direct injection spark-ignition gasoline vehicle particulate matter emissions. SAE International Journal of Fuels and Lubricants 3(2):650-659.
- Torroba, A. 2020a. Atlas de los biocombustibles líquidos 2019-2020 (en línea). San José, Costa Rica, IICA. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/13974/BVE20128304e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Torroba, A. 2020b. Los biocombustibles líquidos en las Américas: situación actual y potencial de desarrollo (en línea). San José, Costa Rica, IICA. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/9975/BVE20058034e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Vohra, K; Vodonos, A; Schwartz, J; Marais, EA; Sulprizio, MP; Mickley, LJ. 2021. Global mortality from outdoor fine particle pollution generated by fossil fuel combustion: results from GEOS-Chem (en línea). Environmental Research 195. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110754>.
- Wu, X; Nethery, RC; Sabath, MB; Braun, D; Dominici, F. 2020. Air pollution and COVID-19 mortality in the United States: strengths and limitations of an ecological regression analysis (en línea). Science Advances 6(45). Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://advances.sciencemag.org/content/6/45/eabd4049>.

Capítulo 2: Introducción a los biocombustibles y los combustibles fósiles

¿Cómo se integran los biocombustibles en los sistemas alimentarios? ¿Existen productos asociados? ¿Cuáles tipos de biocombustibles líquidos existen y dónde se utilizan?

Estas son algunas de las preguntas que guiarán el desarrollo del presente capítulo. Con un enfoque productivo y de interrelación en complejos productivos más amplios, se describirán el bioetanol y el biodiésel, los biocombustibles más utilizados en el transporte terrestre. Asimismo, se detallará la evolución más reciente de los biocombustibles empleados en el transporte marítimo y aéreo.

Aspectos generales

La diversificación en el uso integral y eficiente de la biomasa para producir biocombustibles contribuye a la reducción de GEI, genera valor agregado y empleo y puede aumentar la eficiencia y la seguridad de los sistemas agroalimentarios (Trigo *et al.* 2021).

Desde el punto de vista de la economía industrial, el craqueo de la biomasa da origen a diversos coproductos, entre los cuales se encuentra una serie de biomateriales de diverso valor agregado, incluidos los biocombustibles líquidos, sólidos y gaseosos que, agregados bajo el término de “bioenergías” representan la producción del 10 % de la oferta energética primaria mundial¹⁸. De manera asociada, se genera también una amplia gama de productos vinculados a la alimentación animal y humana y otros de alto valor agregado asociados a la industria farmacéutica, alcohoquímica y oleoquímica.

De esta manera, el craqueo eficiente e integral de la biomasa da origen a una industria categorizada como “multiproducto”¹⁹, en la que la generación de subproductos permite diversificar y complementar la producción de biocombustibles, facilitando una mejor distribución de los costos de producción de las materias primas, lo que torna al sistema más eficiente y productivo. En tal sentido, la eficiencia del proceso productivo está fuertemente marcada no solo por las economías de escala, sino también por las de variedad.

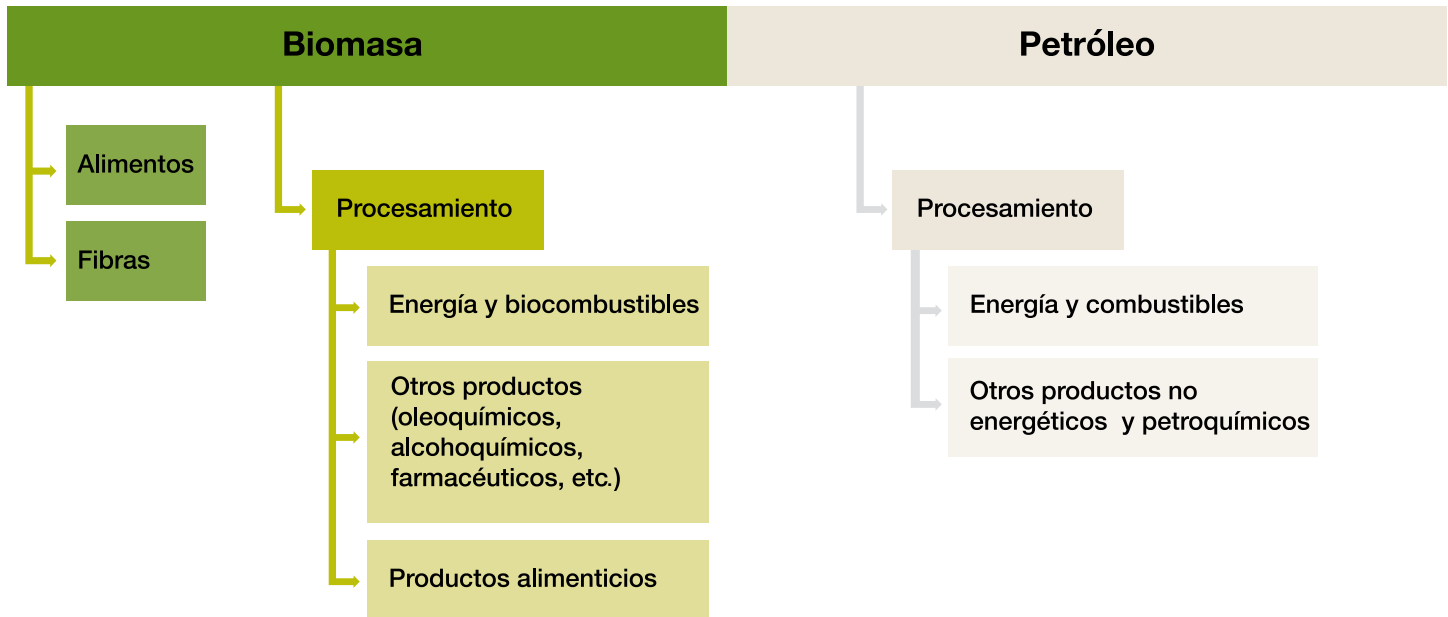
Dependiendo de la materia prima y del tipo de tecnología utilizada, se producen biocombustibles y diversos subproductos. La economía petrolera y de los combustibles fósiles también cuenta con un mecanismo que genera una cesta de subproductos. Normalmente el proceso de refinación de petróleo da origen a tres grandes grupos de productos: livianos, medios y pesados. Entre estos tres grupos se destacan cuatro combustibles líquidos: la gasolina, el diésel, el combustible de avión o queroseno y el fuel oil. Los dos primeros tienen múltiples usos, destacándose el que se les da en el transporte vehicular de pequeña, mediana y gran dimensión, mientras que el combustible de avión se utiliza en las aeronaves y el fuel oil, en embarcaciones marítimas²⁰.

¹⁸AIE (Agencia Internacional de la Energía, Francia). 2019. World energy balances 2019 (en línea). París. Consultado 21 ene. 2020. Disponible en <https://webstore.iea.org/world-energy-balances-2019>.

¹⁹Baumol, W; Willing, R; Panzar, J. 1988. Contestable markets and the theory of industrial structure. California, Estados Unidos de América, HBJ.

Así como el craqueo de moléculas biológicas para producir biocombustibles da origen a diversos subproductos, la economía petrolera no solo produce combustibles, sino también productos con usos alternativos como el asfalto, materiales farmacéuticos, plásticos, plaguicidas, solventes, etc.

Ilustración 9. Productos y subproductos derivados del craqueo de la biomasa y el petróleo.



En 2019 el 53.2 % del consumo total de petróleo fue transformado y consumido como gasolina y diésel (BP 2020), por lo que la utilización de bioetanol y biodiésel reviste cada vez más relevancia.

El paradigma de movilidad terrestre regido por la combustión interna está asociado principalmente a dos tipos de ciclos: Otto y diésel. El primero está estrechamente vinculado al consumo de gasolina y bioetanol y el segundo, al de diésel y biodiésel.

Los principios de operación de un motor de diésel (de compresión-ignición) son significativamente diferentes de los de un motor de nafta (de ignición por bujía). En estos últimos equipos una mezcla casi estequiométrica de combustible y aire se introduce en el cilindro del motor, donde se comprime y se produce la ignición por la bujía. La potencia de este motor se controla limitando la cantidad de la mezcla de combustible y aire a través de una válvula de restricción. En el motor de diésel solo entra aire mediante un sistema de inyección. El aire se comprime a alta temperatura y presión y luego, en forma finamente atomizada, el combustible se inyecta en el aire a gran velocidad. Cuando entra en contacto con el aire a una alta temperatura, el combustible se evapora rápidamente, se mezcla con este y tiene lugar una serie de reacciones espontáneas que terminan en la autoignición. El sistema no requiere una bujía, aunque algunos motores de diésel están equipados con una o varias bujías calentadas eléctricamente para ayudar a poner en marcha el motor en condiciones de baja temperatura. La potencia de este motor está controlada por el volumen de combustible inyectado en el cilindro, por lo que no requiere una válvula o mariposa.

A continuación, se describen los procesos productivos y las materias primas más utilizadas en la producción de biodiésel y bioetanol, así como otros tipos de biocombustibles asociados a la aviación y al transporte marítimo, que sustituyen a los tercer y cuarto combustibles fósiles más utilizados.

Biocombustibles en el transporte terrestre

Biodiésel

El biodiésel es un combustible biológico análogo con el diésel fósil²¹ debido a que presentan propiedades físicas y químicas similares. No solo puede reemplazarlo, sino también complementarlo, ya que se pueden mezclar para formar un bien compuesto.

Según la química, existen varias formas de producir biodiésel de manera industrial, aunque la calidad del producto final está íntimamente ligada con la calidad de la materia prima y la tecnología empleadas en el proceso de producción. Por tradición, en este proceso la materia prima reacciona con un alcohol (casi siempre metanol) y un catalizador (el metilato de sodio es el más utilizado). Dicho proceso químico, denominado transesterificación, es el más usado en la fabricación de biodiésel “FAME” (fatty acid methyl esters, ésteres metílicos de los ácidos grasos). Esta consiste en la reacción entre un triglicérido (compuesto por una molécula de glicerol esterificada por tres moléculas de ácidos grasos) contenido en el aceite vegetal o la grasa animal y un alcohol ligero (metanol o etanol), por medio de la cual se obtienen glicerina y ésteres derivados de los tres ácidos grasos de partida, es decir, biodiésel. En general, se suele usar metanol como alcohol de sustitución, en cuyo caso el biodiésel estará compuesto por ésteres metílicos.

Como ya se mencionó, el alcohol más utilizado en el proceso de transesterificación es el metanol, debido a su costo y cinética de reacción. Otros alcoholes, como el etanol o el isopropanol, se pueden usar en lugar del metanol.

En teoría, la reacción de transesterificación puede ocurrir en medios ácidos y alcalinos; no obstante, la catálisis alcalina (hidróxido de sodio o de potasio o sus alcóxidos, en este caso, metóxidos –metóxido de sodio o potasio-, también llamados metilatos –metilato de sodio o de potasio-) es mucho más rápida que la catálisis ácida.

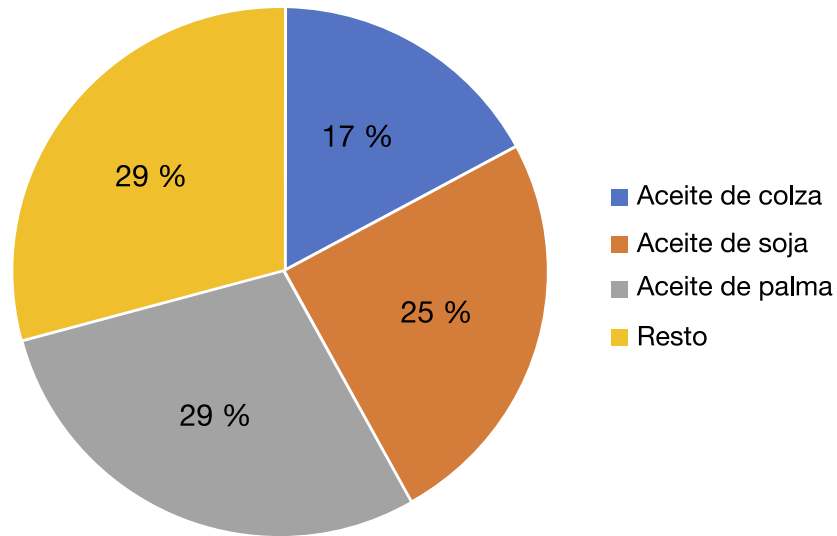
Las materias primas más utilizadas son los aceites vegetales de palma, soja y colza. Los procesos productivos que dan origen a los tres tipos de aceites también originan distintos subproductos alimenticios, de fibras y energías²². Adicionalmente, se pueden utilizar otras materias, destacándose el aceite vegetal usado, el cebo vacuno y otros aceites vegetales²³.

²¹De acuerdo con la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM) (IICA,2010), el biodiésel es un combustible compuesto por monoalquilésteres provenientes de ácidos grasos de cadena larga derivados de aceites vegetales o grasas animales, al que se le asigna el nombre genérico de B100 y cumple los requisitos de la norma ASTM D 6751. En cambio, en su plexo normativo EN 14214, la normativa europea lo define como FAME. Consecuentemente, otros materiales como los aceites vegetales puros, los hidrocarburos preparados a partir de cualquier método industrial o el diésel producido a través de la gasificación de la biomasa utilizando el proceso Fischer-Tropsch no son considerados en la normativa europea como biodiésel.

²²De esta manera se crea un complejo productivo con escalas e insumos distintos de los fósiles. Para obtener más detalles sobre los subproductos, consúltese Torroba (2020b).

²³Para conocer más detalles sobre los pretratamientos necesarios en virtud de la materia prima utilizada, consúltese ARPEL e IICA (2009).

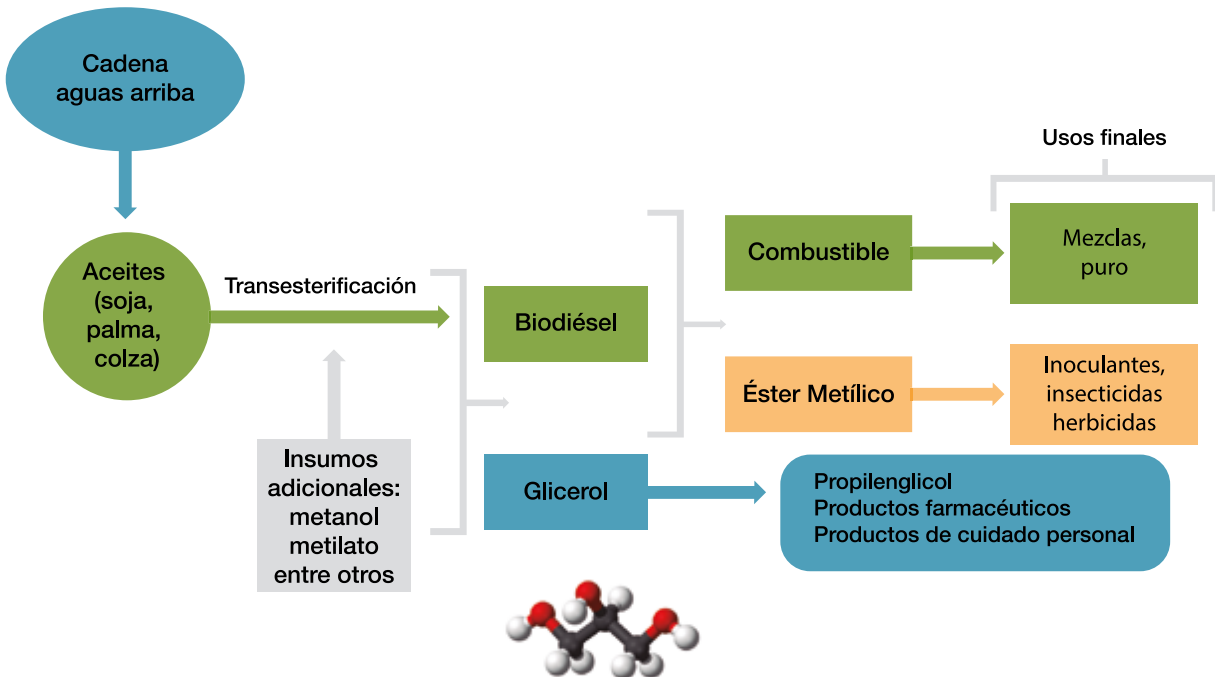
Ilustración 10. Producción porcentual de biodiésel en 2019 de acuerdo con el origen de la materia prima.



Fuente: Tomado de Torroba 2020b.

El biodiésel y el glicerol tienen diversos usos. En primer lugar, como ya se mencionó, el biodiésel se puede utilizar como combustible en estado puro o en mezclas con diésel fósil. Además, bajo el nombre químico de “éster metílico”, se emplea en la fabricación de inoculantes, herbicidas e insecticidas. El glicerol o glicerina se usa “crudo” o “refinado” como insumo en las industrias farmacéutica, tabacalera y alimentaria y en la obtención de diferentes subproductos de elevado valor agregado, como el propilenglicol y el etilenglicol.

Ilustración 11. Producción de biodiésel y sus subproductos a base de aceites vegetales



Adicionalmente, se destaca la producción de diésel renovable mediante un proceso diferente de la transesterificación de aceites o FAME, es decir, por medio de la hidrogenación, la gasificación, la pirólisis y otras tecnologías bioquímicas y termoquímicas de aceites vegetales o grasas animales. El proceso más utilizado se conoce como aceite vegetal hidrogenado (HVO), que ya representa el 13 % del biodiésel producido en el mundo. De acuerdo con Chum *et al.* (2015), también se le conoce como diésel verde y ésteres hidrogenados y ácidos grasos (HEFA), normalmente producidos con corrientes de hidrógeno, en ocasiones provenientes de refinerías de petróleo²⁴. Si bien es cierto que el diésel renovable presenta características distintas de las de los FAME²⁵, en este documento se denomina a ambos “biodiésel”, para fines de estadística de producción y consumo.

La cantidad de biodiésel contenida en el diésel fósil recibe el nombre de “corte” o “mezcla”. En las mezclas, denominadas Bx, la x es la proporción de biodiésel que contienen. Por lo tanto, una proporción de 5 % de biodiésel y 95 % de diésel es un corte o una mezcla denominada B5. Si la proporción fuera 10 % y 90 %, respectivamente, el corte se llamaría B10 y así sucesivamente. El biodiésel puro recibe el nombre de B100.

Bioetanol

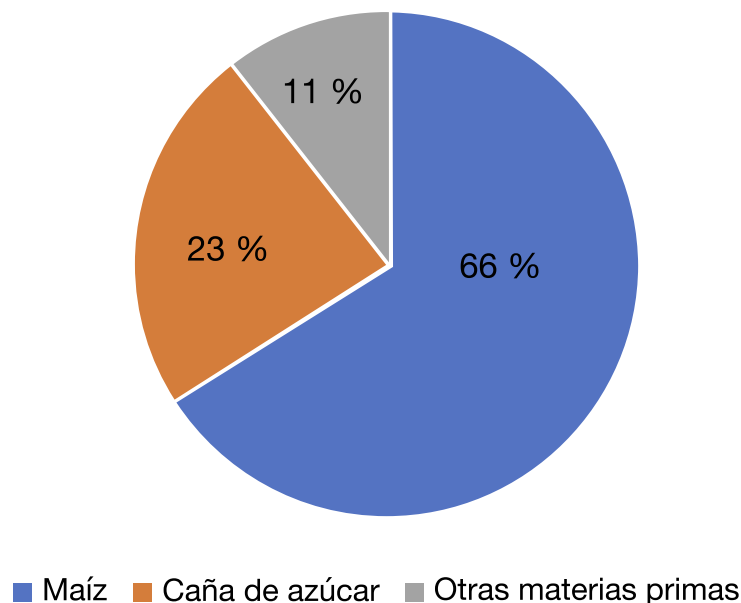
El bioetanol es un alcohol etílico derivado de la fermentación de materias primas con un alto contenido de azúcar (como la caña de azúcar o la remolacha azucarera), cereales (como el maíz) y productos lignocelulósicos obtenidos de la biomasa. Se puede utilizar en motores de combustión, mezclado con gasolina o directamente, en reemplazo de esta.

²⁴De acuerdo con el Departamento de Energía de los Estados Unidos (USDOE) (2020), (https://afdc.energy.gov/fuels/emerging_hydrocarbon.html) entre las vías tecnológicas en exploración para producir biocombustibles de hidrocarburos renovables (incluido el HVO) se encuentran:

- El hidrotratamiento tradicional, utilizado en las refinerías de petróleo. Implica la reacción de la materia prima (lípidos) con el hidrógeno a temperaturas y presiones elevadas en presencia de un catalizador. En la actualidad, las plantas comerciales utilizan esta tecnología.
- La mejora biológica del azúcar, que utiliza un proceso de deconstrucción bioquímica similar al del etanol celulósico, a través de la adición de organismos que convierten los azúcares en hidrocarburos.
- La conversión catalítica de azúcares, que supone una serie de reacciones catalíticas para convertir una corriente de carbohidratos en combustibles de hidrocarburos.
- La gasificación, un proceso durante el cual la biomasa se convierte térmicamente en gas de síntesis y, catalíticamente, en combustibles de hidrocarburos.
- La pirólisis, que conlleva la descomposición química de materiales orgánicos a temperaturas elevadas en ausencia de oxígeno. El proceso produce un aceite de pirólisis líquido que se puede convertir en combustibles de hidrocarburos, ya sea en un proceso independiente o como materia prima para la alimentación conjunta con petróleo crudo en una refinería de petróleo estándar.
- El procesamiento hidrotermal, en el que se utiliza una alta presión y una temperatura moderada para iniciar la descomposición química de la biomasa o los materiales de desecho húmedos, a fin de producir un aceite que se puede convertir catalíticamente en combustibles de hidrocarburos.

²⁵Diferentes puntos de congelamiento, número de cetano, etc.

Ilustración 12. Producción porcentual de bioetanol en 2019 según la materia prima.



Fuente: Tomado de Torroba 2020b.

La producción de bioetanol con base en azúcares como el de caña o remolacha es más sencilla químicamente que la fundamentada en cereales, ya que implica una etapa menos en el proceso productivo por la disponibilidad de los azúcares en la biomasa.

En general, el proceso, basado en la extracción de los azúcares (mediante la molienda o la difusión), puede pasar directamente a la fermentación. Tras esta, se destila el alcohol -como en el caso de la producción fundamentada en el almidón-.

De acuerdo con el Banco Nacional de Desarrollo Económico y Social (BNDES 2008), la producción de bioetanol a base de caña de azúcar se puede realizar con dos insumos: el jugo directo de la caña y la melaza, también denominada miel agotada²⁶. Aunque la refundición del azúcar crudo se utilice menos, por medio de ella es posible también generar bioetanol. Al considerarse las ecuaciones químicas de la transformación de la sacarosa en bioetanol, resulta que 1 kg de azúcar permite teóricamente producir 0.684 l de bioetanol anhidro²⁷. Si, en cambio, se utiliza melaza, que es un subproducto de la producción del azúcar, se obtiene un resultado mucho menor. Entonces, si en el proceso productivo se utiliza como insumo el jugo directo, se pueden producir más de 80 l de bioetanol por tonelada de caña; si lo que se utiliza es la melaza agotada, se producen solo cerca de 12 l por tonelada de caña procesada y el resto de la caña se transformará en aproximadamente de 110 a 130 kg de azúcar²⁸.

²⁶La melaza es una parte de la caña que, durante el proceso de fabricación del azúcar, se satura y no llega a cristalizarse.

²⁷Ecuación estequiométrica: el volumen varían de acuerdo con la tecnología utilizada.

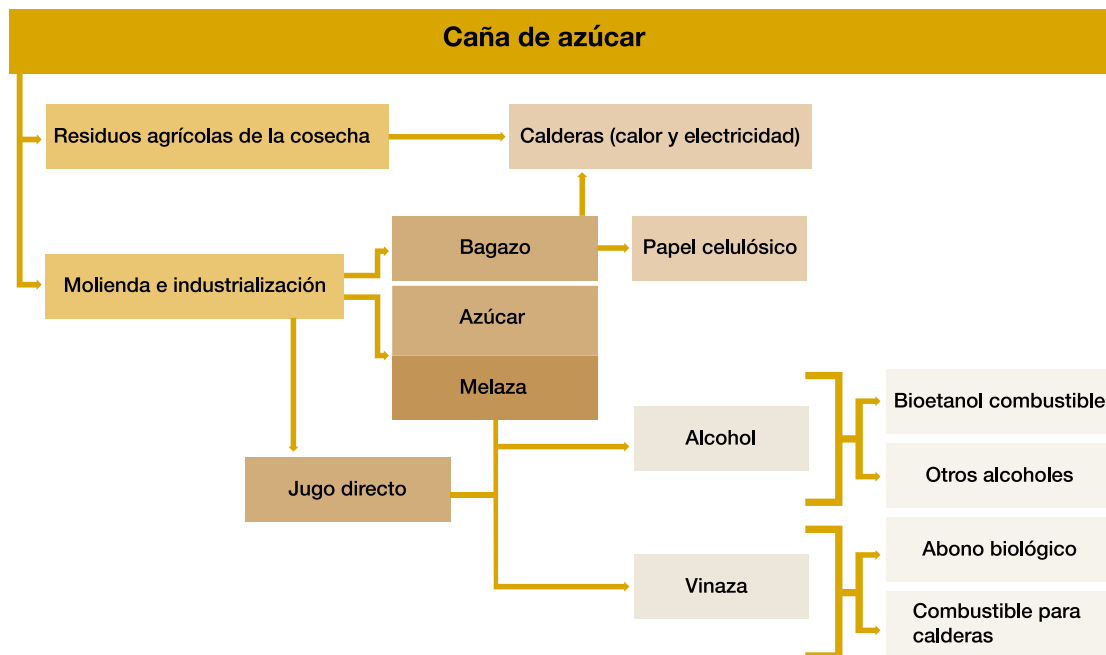
²⁸Los rendimientos del alcohol y el azúcar varían de acuerdo con las tecnologías y las características de la materia prima.

Además, en forma asociada, durante el proceso productivo de bioetanol y/o azúcar se obtiene bagazo, que tiene un alto contenido de celulosa, así como diversos usos, entre los que se destaca la generación de energía. En este sentido, se puede quemar en una caldera para generar vapor, necesario en ese mismo proceso industrial, o producir bioelectricidad, empleada no solo en el proceso industrial de producción de bioetanol y azúcar, sino también en la generación de excedentes para su inyección en la red eléctrica.

Algunos ingenios suelen utilizar parte del residuo agrícola de la cosecha con una función similar a la del bagazo en la alimentación de calderas.

Durante el proceso de destilación se obtiene vinaza, un producto líquido con una alta carga orgánica. Se utiliza como biofertilizante y también como combustible para generar energía en calderas²⁹.

Ilustración 13. Esquema de producción de azúcar, bioetanol y subproductos a base de caña de azúcar.

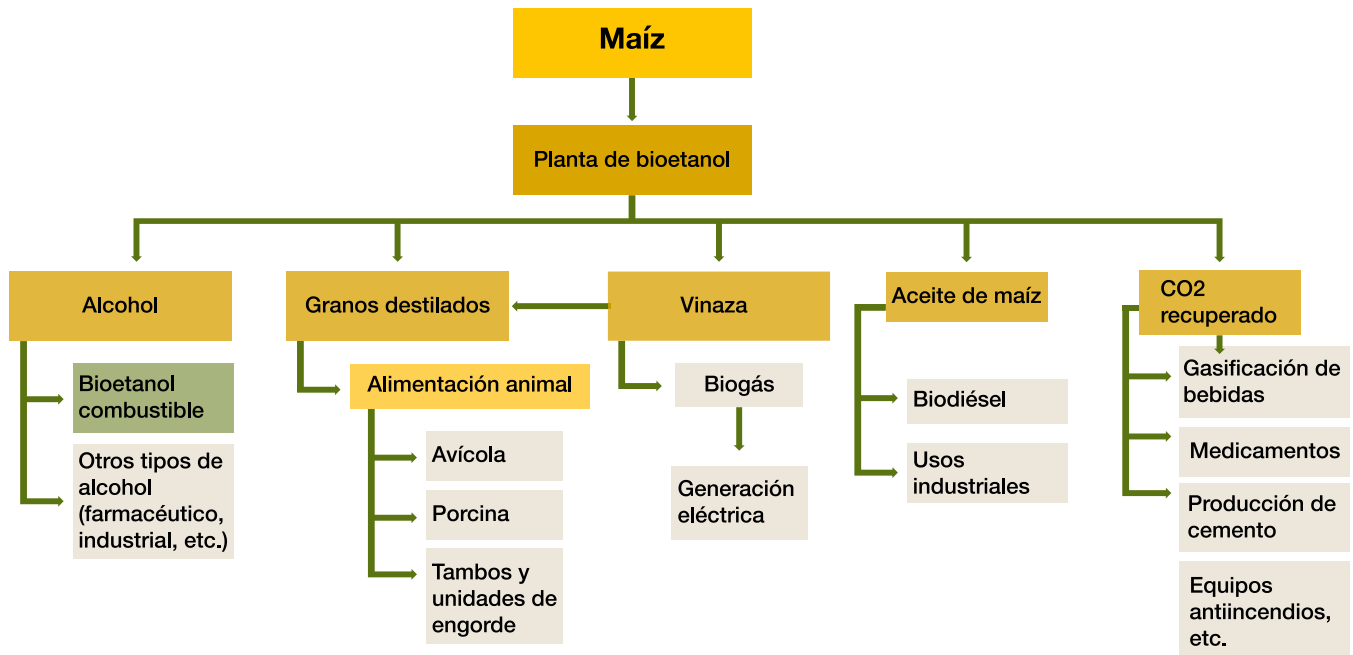


En el caso de los cereales, la tecnología de conversión comienza generalmente con la selección, la limpieza y la molienda del grano. La molienda puede ser húmeda o seca, dependiendo de si el grano es embebido y fraccionado antes (vía húmeda) o durante (vía seca) la conversión del almidón en azúcar. En ambos tipos de molienda el almidón se convierte en azúcar a través de un proceso enzimático efectuado a altas temperaturas. Los azúcares liberados son fermentados con levaduras, mientras que el alcohol resultante se destila para purificar el bioetanol.

²⁹Los procesos productivos están comenzando a incorporar nuevos subproductos. Un ejemplo de ello es el recupero de levaduras, que se puede usar como suplemento alimenticio.

En el caso del maíz -el cereal más utilizado en la producción de este tipo de biocombustible-, con una tonelada se puede producir bioetanol y granos destilados³⁰ para la alimentación animal y recuperar el CO₂ del proceso industrial para diferentes usos, como la producción de bebidas gasificadas. Adicionalmente, diversas plantas de producción de bioetanol de maíz han incorporado procesos para obtener aceite de maíz, con diversos usos industriales como la producción de biodiésel. La vinaza producida es rica en proteínas solubles (entre el 30 % y el 35 %), lo que permite agregarla a los granos destilados. También se puede emplear en la producción de biogás³¹.

Ilustración 14. Esquema de producción de bioetanol y subproductos a partir de maíz.

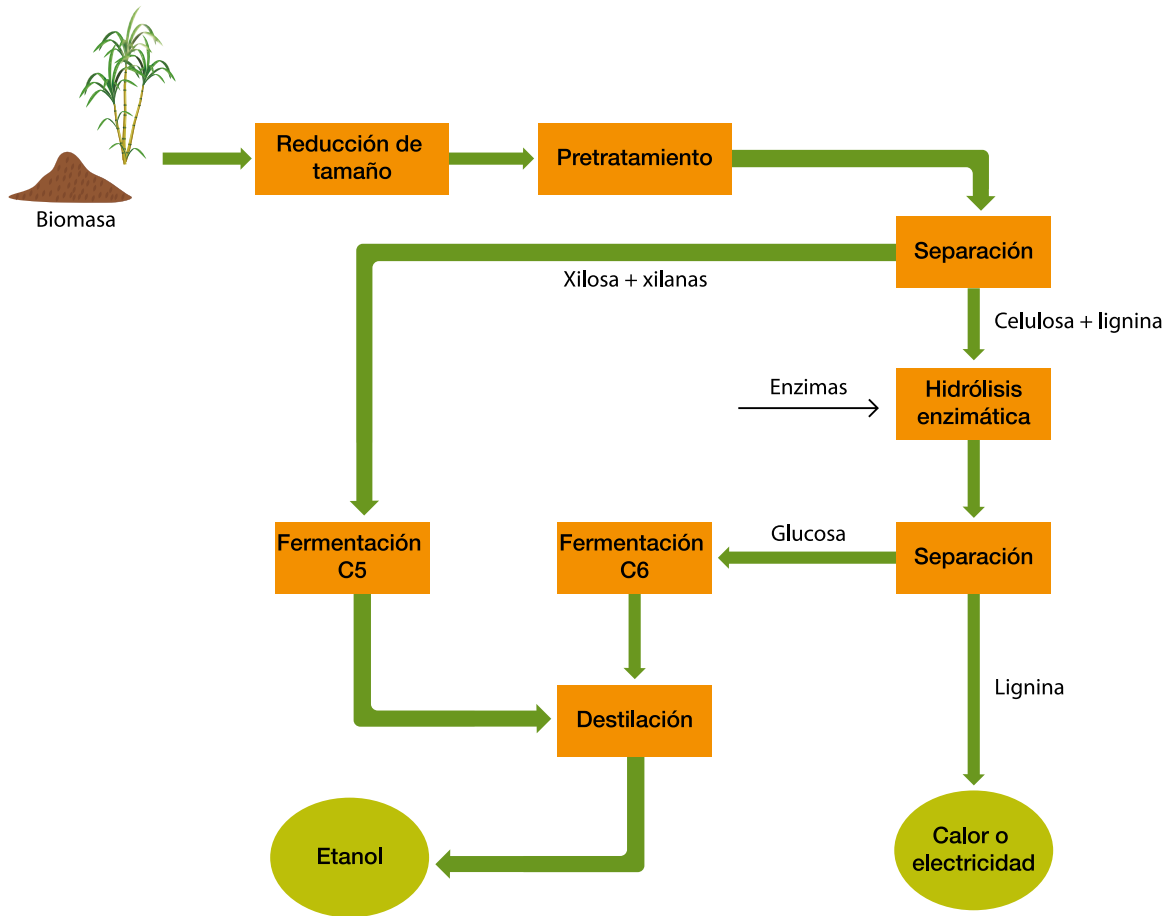


Como tercera alternativa, se puede producir bioetanol a base de material celulósico, es decir, de diversas materias primas de origen biológico, como tallos de maíz, bagazo de caña, biomasa forestal y otras hierbas, para lo cual se requiere un pretratamiento con enzimas, a fin de descomponer la celulosa. Este proceso, junto con la logística previa asociada a la obtención, la recolección, la consolidación, el transporte y el almacenamiento de una materia prima requerida en grandes volúmenes, vuelve a esta vía tecnológica mucho más onerosa que las descritas anteriormente. A pesar de que existen plantas a escala comercial, los elevados costos de producción han impedido un desarrollo considerable del bioetanol celulósico.

³⁰También conocidos como “burlanda”. Para obtener una descripción más amplia de los diferentes tipos de granos destilados que se pueden obtener, consúltese Torroba (2020a). Adicionalmente, se puede encontrar información detallada al respecto en el Manual de granos secos de destilería con solubles (DDGS) del Consejo de Granos de los Estados Unidos, disponible en el siguiente enlace: https://grains.org/wp-content/uploads/2018/01/DDGS_Handbook-Spanish2012.pdf.

³¹Para ver un ejemplo concreto de este último proceso, consúltese Lachman *et al.* (2020).

Ilustración 15. Esquema de producción de bioetanol a base de material lignocelulósico.



Fuente: Elaborado con base en Machado 2010.

En las tres vías tecnológicas y de materias primas la destilación es el paso productivo común, posterior a la fermentación de los azúcares. Dicho proceso forma un azeótropo que, de acuerdo con la estequiometría, tiene un volumen de 4 % de agua y 96 % de etanol. Esta molécula, conocida como alcohol hidratado, se puede utilizar en la producción de bebidas alcohólicas y de alcohol sanitizante o en gel, entre otros usos industriales.

Sin embargo, se usa más ampliamente en la generación de combustible, para lo cual se suele agregar un proceso posterior llamado “deshidratación”, durante el cual el alcohol es purificado, disminuyendo su contenido de agua para obtener una molécula con un volumen de etanol igual o superior al 99 %³².

A diferencia del biodiésel, la molécula de bioetanol es idéntica en todos los casos, sin importar la materia prima ni la ruta tecnológica utilizada.

En forma similar al biodiésel, las mezclas se denominan Ex, donde x representa la proporción de bioetanol contenida. El bioetanol puro recibe el nombre de E100.

³²Existen tecnologías vehiculares, como la de combustible flexible de Brasil, mediante las cuales los automóviles funcionan con alcohol hidratado en estado puro o mezclado con gasolina.

Otros biocombustibles utilizados en la aviación y la navegación

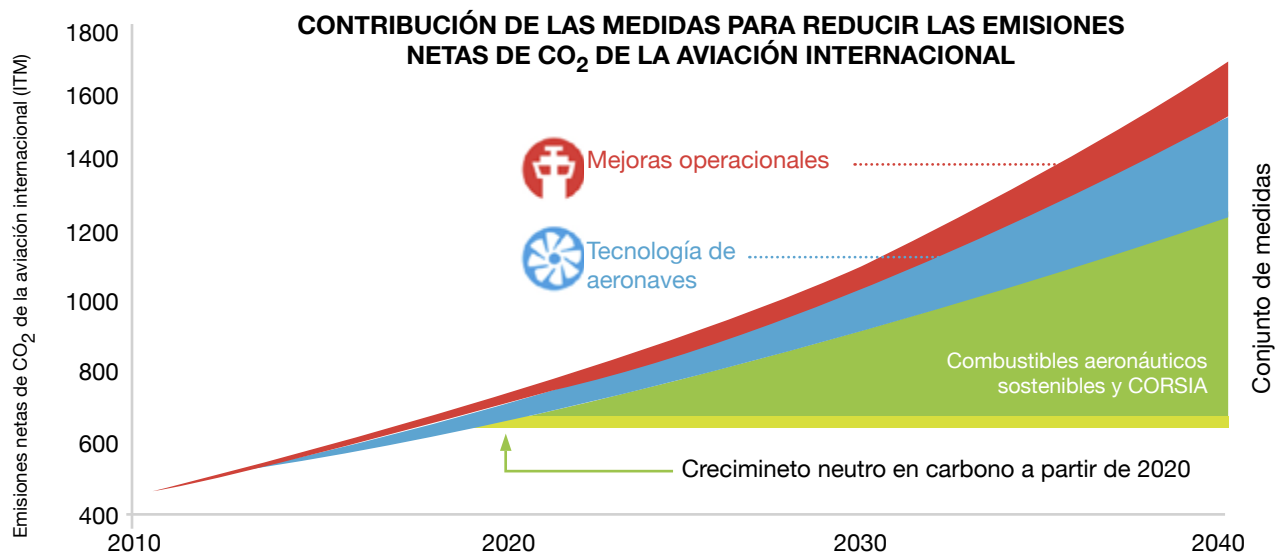
Biocombustibles para la aviación

En la aviación se han asumido serios compromisos en cuanto a la emisión de GEI. En 2010, durante la 37.a Sesión de la Asamblea de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), se dio un importante paso al abordar el tema de dichas emisiones producidas por la aviación civil internacional, con el propósito de cumplir las metas relativas al clima en el ámbito global.

Las metas establecidas eran reducir las emisiones de CO₂ a un promedio de 1.5 % al año durante el período 2009-2020, con miras a lograr un crecimiento neutro de carbono a partir de 2020 y disminuir sus emisiones de carbono en 50 % para 2050, en comparación con los niveles de 2005³³.

Con el fin de alcanzar los objetivos globales y, en definitiva, un futuro sostenible para la aviación internacional, la OACI ha enfocado su estrategia en el desarrollo y la implementación de una “canasta de medidas de mitigación” para reducir las emisiones de CO₂ de esta industria, la cual incluye adelantos en la tecnología de las aeronaves, mejoras operativas, combustibles alternativos sostenibles y medidas basadas en el mercado, conforme se muestra en la siguiente figura.

Ilustración 23. Contribución de las medidas de reducción de emisiones netas de CO₂ de la aviación internacional a partir de 2020.



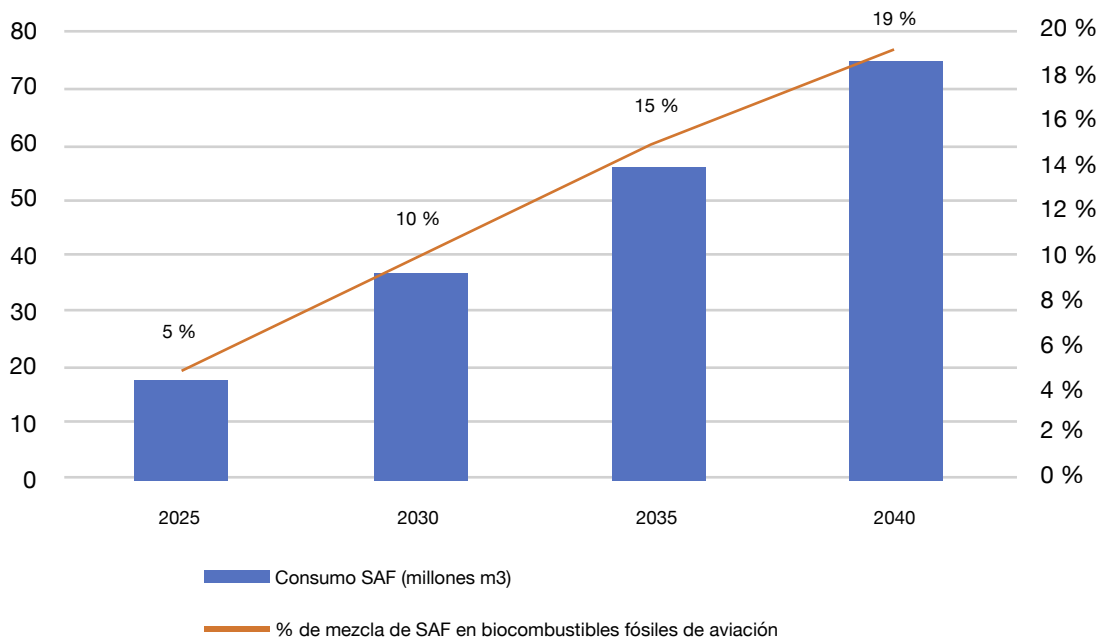
Fuente: Tomado de OACI 2013.

³³En 2020, debido a la pandemia de la COVID-19, se produjo una disminución de la línea base del Plan de Compensación y Reducción de Carbono para la Aviación Internacional (CORSIA) (promedio de las emisiones totales de CO₂ de 2019 y 2020), en comparación con el escenario sin dicha enfermedad. El Consejo de la Organización de la Aviación Internacional acordó que, a fin de protegerse contra una carga económica inapropiada, las emisiones de 2020 no deberían utilizarse en las tres características del diseño del CORSIA. A este respecto, el Consejo decidió que, durante la fase piloto, las emisiones de 2019 se utilizarán para las emisiones de 2020 (<https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/CORSIA-and-Covid-19.aspx>).

A principios de 2020, 119 Estados Miembros de la OACI (que representan el 94.3 % del tráfico aéreo mundial) habían presentado planes de acción estatales, frente a los 111 del año anterior, en apoyo a la producción y el uso de combustibles de aviación alternativos sostenibles, específicamente combustibles producidos a partir de biomasa, que incluye diferentes tipos de desechos orgánicos. Mientras tanto, más de 200 000 vuelos comerciales se habían realizado con mezclas de combustibles alternativos, frente a los 150 000 del año anterior. En al menos ocho aeropuertos se efectuaba una distribución regular de combustible alternativo mezclado, frente a cinco el año anterior, mientras que al menos 14 aeropuertos tenían entregas por lotes de dichos combustibles.

Según la AIE (2019a), mezclar biocombustibles sostenibles para la aviación de bajo contenido de carbono con combustible fósil para aviones será esencial para alcanzar este objetivo. Esto se refleja en su Escenario de Desarrollo Sostenible, donde se prevé que en 2030 los biocombustibles suplirán alrededor del 10 % de la demanda de combustible de aviación y, en 2040, cerca del 20 %. Asimismo, la IRENA (2020), en su “Transforming Energy Scenario”³⁴, estima que en 2050 el consumo de *biojet* llegará a los 100 000 000 m³, siendo los biocombustibles la única opción disponible para reducir significativamente las emisiones de dicho sector.

Ilustración 16. Consumo de combustibles sostenibles en la aviación según el Escenario de Desarrollo Sostenible 2025-2040.



Fuente: Tomado de AIE 2019a.

De acuerdo con el Centro de Datos de Combustibles Alternativos y Vehículos Avanzados (AFDC 2021) del USDOE, el combustible sostenible para aviación (SAF), derivado de recursos renovables, permite reducir las emisiones netas de dióxido de carbono durante el ciclo de vida. También se le conoce como combustible renovable para aviación, combustible alternativo para aviación, biocombustible para aviación, *biojet* o combustible alternativo sostenible para aviación.

³⁴En este escenario se describe una ambiciosa, pero realista vía de transformación energética, basada en gran medida en fuentes de energía renovables y en una eficiencia energética constantemente mejorada (aunque no se limita exclusivamente a estas), a fin de mantener el aumento de las temperaturas globales a muy por debajo de 2° C y hacia 1.5 °C durante este siglo.

Existen principalmente tres familias de materias primas biológicas que se pueden emplear en la producción de combustibles alternativos para aviones: la de los aceites, grasas o triglicéridos, la de los azúcares y la de materias primas lignocelulósicas.

- **Combustibles elaborados a partir de aceites y grasas**

En la actualidad, los triglicéridos provienen principalmente de cultivos oleaginosos, grasas animales y aceite de cocina usado. La producción con microalgas, una vía adicional prometedora, se encuentra en la etapa de investigación y desarrollo. Los triglicéridos contienen oxígeno que se debe eliminar para producir componentes de combustible para aviones, ya que son hidrocarburos puros, para lo cual se proponen diferentes procesos; sin embargo, el método aprobado es el de HEFA.

- **Combustibles a base de azúcares y almidón**

Estos azúcares provienen de cultivos, mientras que el almidón se extrae de cereales. Se asocian principalmente a rutas de fermentación que producen alcoholes que se convierten en hidrocarburos. Esta es la ruta alcohol para *jet* (ATJ). Además, se ha desarrollado una fermentación avanzada que genera directamente hidrocarburos transformables en componentes de combustible para aviones. Cabe señalar que la fermentación se ha desarrollado también a partir de gases residuales industriales en forma de monóxido de carbono. El cultivo de algas es una forma de utilizar los gases residuales para producir materias primas; de hecho, el CO₂ es necesario para cultivar algas. Los métodos actualmente aprobados que siguen estos procesos son las isoparafinas sintéticas (SIP), anteriormente denominadas conversión directa de azúcar en hidrocarburos (DSHC), y alcohol para queroseno parafínico sintético de *jet* (ATJ-SPK).

- **Combustibles elaborados a partir de lignocelulosa**

La lignocelulosa, que se encuentra en la pared de las células de las plantas y en la madera, proviene de diversos cultivos energéticos, residuos agrícolas o forestales y macroalgas. Se puede convertir directamente en hidrocarburos por medio de procesos termoquímicos como el Fischer-Tropsch (FT) y la pirólisis o craqueo catalítico. Los procesos de FT, queroseno parafínico sintético Fischer-Tropsch (FT-SPK) y queroseno sintético con aromáticos Fischer-Tropsch se pueden utilizar también para convertir residuos sólidos municipales, carbón o gas natural.

La lignocelulosa se puede transformar en azúcar y, por lo tanto, se puede usar en las rutas de fermentación mencionadas anteriormente. De manera similar, los azúcares pueden transformarse en aceite a través de levaduras o microalgas y, por lo tanto, procesarse posteriormente en combustible para aviones mediante desoxigenación.

- **Rutas avanzadas adicionales**

Se están estudiando rutas adicionales para producir combustibles alternativos directamente a partir del CO₂, incluido el CO₂ capturado de la atmósfera, sin utilizar biomasa. Luego, la conversión usa energía renovable para descomponer el CO₂ en CO y O₂ y el agua en H₂ y O₂, para después recombinar CO y H₂ en un hidrocarburo líquido utilizando FT. Estos procesos (por ejemplo, el de combustibles solares) se encuentran actualmente en la etapa de investigación.

Por consiguiente, una gran cantidad de procesos en desarrollo permite el procesamiento de casi todos los tipos de materia prima en componentes de combustible para aviones, lo que ofrece flexibilidad para la adaptación y la optimización.

La mayoría de estas diversas vías no producen directamente un combustible de avión, sino componentes que se deben mezclar con *jet A-1* para obtener el combustible final. Cabe señalar que estos procesos coproducen combustibles que se pueden utilizar en el transporte por carretera.

Actualmente, se han aprobado siete rutas tecnológicas para la obtención de combustible SAF, según la norma ASTM D7566:

1) FT-SPK. Utilizando esta tecnología, a partir de biomasa lignocelulósica (por ejemplo, residuos de madera) se produce queroseno parafínico sintetizado hidroprocesado. El nivel máximo de mezcla en el combustible para aviación es de 50 %.

De acuerdo con Wang *et al.* (2016), las materias primas provenientes de la biomasa requieren un pretratamiento, es decir, se secan y muelen para reducir su contenido de humedad y tamaño. Existe una gran variedad de tecnologías de gasificación para convertir la biomasa en gas de síntesis. En un proceso de gasificación a temperaturas de alrededor de 1300 °C, en presencia de oxígeno y vapor de alta pureza, la biomasa se presuriza y se convierte en gas de síntesis crudo. Este gas sintético se comprime y se procesa por medio de la síntesis FT. Esta síntesis es un conjunto de procesos catalíticos que da como resultado la conversión del gas de síntesis en biocombustible para aviación. La Alianza de Australia y Nueva Zelanda para el Uso de Combustible Sostenible en la Aviación (SAFAANZ 2020) señala que a partir del proceso FT se producen combustibles líquidos idénticos a los elaborados con petróleo; sin embargo, dicho proceso no suele generar las cicloparafinas ni los compuestos aromáticos que se encuentran típicamente en el combustible para aviones a base de petróleo.

2) Queroseno parafínico sintético (SPK) con tecnología HEFA. El SPK se produce a partir de ácidos grasos y ésteres hidroprocesados, derivados de aceite de cocina usado, grasa animal, algas y aceites vegetales (como la camelina). Su nivel máximo de mezcla es de 50 %.

Esta ruta tecnológica conlleva una serie de procesos catalíticos de: a) hidrogenación, b) desoxigenación, c) hidroisomerización y d) hidrocraqueo. La hidrogenación catalítica se utiliza para convertir ácidos grasos insaturados en fase líquida o glicéridos en saturados con la adición de hidrógeno. El siguiente paso es escindir el propano y producir ácidos grasos libres. Una ruta alternativa para convertir los glicéridos en ácidos grasos libres es la hidrólisis térmica. Luego pasan a una etapa de desoxigenación, para posteriormente hidrocraquear e hidroisomerizar las parafinas normales producidas por desoxigenación a un producto SPK con cadenas de carbono de la C9 a la C15. Las reacciones de craqueo e isomerización son simultáneas o secuenciales. El proceso de isomerización toma los hidrocarburos de cadena lineal y los convierte en estructuras ramificadas para reducir el punto de congelación y cumplir con la norma de combustible para aviones.

3) SIP con tecnología de azúcares fermentados hidroprocesados (HFS). A partir de HFS, se sintetiza combustible de isoparafina sintetizada. Anteriormente se le conocía como DSHC. El nivel máximo de mezcla aceptado es de 10 %.

Existen dos vías para producir combustibles a base de materias primas ricas en azúcar: por mejora catalítica (utilizando procesos químicos o bioquímicos) y por conversión biológica (en condiciones aerobias o anaerobias). Durante este proceso se utilizan levaduras modificadas para fermentar azúcares en una molécula de hidrocarburo, lo que da lugar a una molécula de hidrocarburo C15 llamada farneseno que, después del hidroprocesamiento, se puede utilizar como mezcla en combustible para aviones.

4) Queroseno parafínico sintético más aromáticos (SPK/A), con tecnología FT. Utilizando como materia prima biomasa lignocelulósica, a través de la alquilación de aromáticos ligeros de fuentes no derivadas del petróleo, se produce queroseno sintetizado con aromáticos, que permite un nivel máximo de mezcla del 50 % con combustible fósil para aviación. Se utiliza la técnica FT más la alquilación de aromáticos ligeros (principalmente benceno) para crear una mezcla de hidrocarburos, que incluye compuestos aromáticos necesarios para evitar fugas de combustible.

5) SPK con tecnología ATJ. A partir de isobutanol o etanol se sintetiza SPK. El nivel máximo de mezcla es de 50 %.

Los alcoholes se pueden producir mediante varias vías de conversión, pero todas ellas comienzan con una materia prima proveniente de la biomasa. La elección de la materia prima inicial influye en muchos factores, como el método de pretratamiento, la elección de microorganismos, el rendimiento del alcohol, etc. Entre las materias primas utilizadas se incluyen la caña de azúcar y la remolacha azucarera, el almidón de grano hidrolizado de trigo o maíz y polisacáridos hidrolizados de biomasa lignocelulósica. Si se usa materia prima lignocelulósica, el etanol se puede producir bioquímicamente (con productos químicos, enzimas y microorganismos fermentativos) o por medio de una conversión termoquímica (con calor y sustancias químicas). En el proceso bioquímico, la celulosa y la hemicelulosa se hidrolizan enzimáticamente en azúcares solubles y luego se fermentan con levaduras o bacterias para producir etanol. En el proceso termoquímico se produce etanol a través de la gasificación y la síntesis de mezclas de alcohol y luego se genera la deshidratación del isobutanol o etanol, seguida de la oligomerización, la hidrogenación y el fraccionamiento para producir el componente de mezcla.

6) Combustible sintético para *jet* con tecnología de hidrotermólisis catalítica (CHJ). A partir de grasas y aceites se sintetiza combustible para aviación mediante hidrotermólisis catalítica (o licuefacción hidrotermal). El nivel máximo de mezcla es de 50 %.

Esta vía contiene una serie de reacciones que incluyen: a) craqueo, b) hidrólisis, c) descarboxilación, d) isomerización y e) ciclación y que dan como resultado la conversión de los triglicéridos en una mezcla de hidrocarburos de cadena lineal, ramificada y cíclica.

7) SPK con tecnología de alto contenido de hidrógeno (HHC): por medio de esta vía se produce SPK a partir de hidrocarburos, ésteres y ácidos grasos hidroprocesados. El nivel máximo de mezcla es de 10 %.

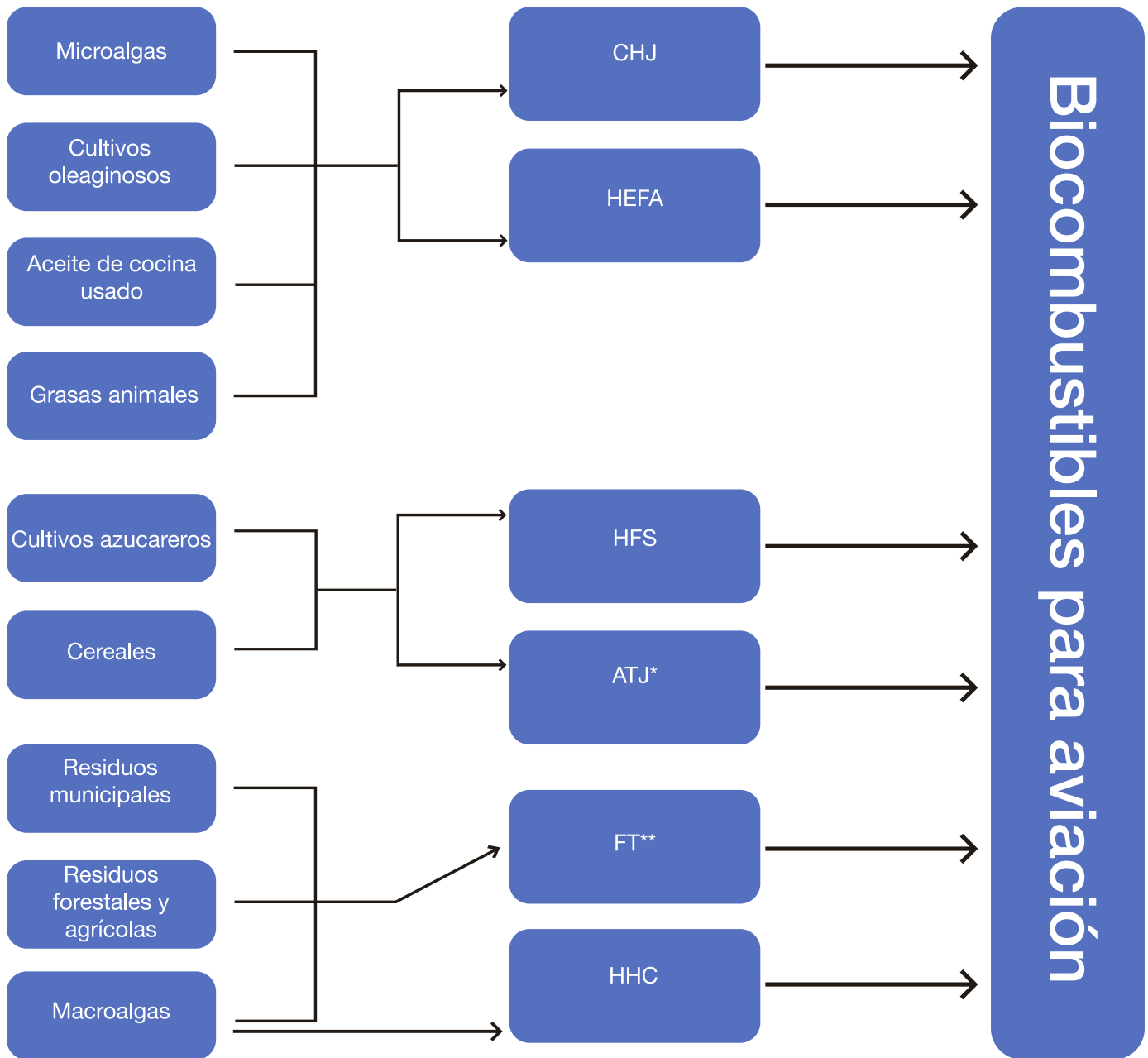
De acuerdo con la Oficina de Eficiencia Energética y Energías Renovables del USDOE (2020), los lípidos obtenidos de las algas se someten a un hidrocraqueo/hidroisomerizado para eliminar todo el O₂ y saturar los dobles enlaces. El producto es rico en isoalcanos.

Tabla 1: Vías de la ASTM aprobadas para la producción de SAF.

Proceso aprobado por la ASTM	Año de aprobación	Opciones de materia prima	Proporción de mezcla por volumen
FT-SPK Queroseno parafínico sintetizado hidroprocesado por Fischer-Tropsch	2009	Biomasa lignocelulósica Residuos agrícolas y forestales (por ejemplo, bagazo y rastrojo de caña de azúcar, copas de árboles, rastrojo y tallos de maíz) y desechos municipales	Hasta 50 %
HEFA-SPK Queroseno parafínico sintetizado a partir de ácidos grasos y ésteres hidroprocesados	2011	Aceites y grasas Camelina, <i>Jatropha</i> , aceite de ricino, de palma y de cocina usado y grasa animal	Hasta 50 %
HFS-SIP Isoparafinas sintetizadas producidas a partir de azúcares fermentados hidroprocesados	2014	Conversión microbiana de azúcares en hidrocarburos Caña de azúcar, mandioca, sorgo y maíz	Hasta 10 %
FT-SPK/A Queroseno sintetizado con aromáticos derivados de la alquilación de aromáticos ligeros de fuentes no derivadas del petróleo	2015	Biomasa lignocelulósica Residuos agrícolas y forestales (por ejemplo, bagazo de caña de azúcar, rastrojo de caña de azúcar, copas de árboles, rastrojo y tallos de maíz) y desechos municipales	Hasta 50 %
ATJ-SPK (isobutanol) Queroseno parafínico sintético de alcohol para <i>jet</i>	2016	Biomasa utilizada para la producción de azúcar y biomasa lignocelulósica Caña de azúcar, mandioca, sorgo, maíz y etanol	Hasta 50 %
ATJ-SPK (etanol) Queroseno parafínico sintético de alcohol para <i>jet</i>	2018	Biomasa utilizada para la producción de azúcar y biomasa lignocelulósica Caña de azúcar, mandioca, sorgo, maíz y etanol	Hasta 50 %
CHJ Combustible sintético para <i>jet</i> por hidrotermólisis catalítica	2020	Materia prima basada en triglicéridos Residuos, algas, soja, <i>Jatropha</i> , camelina y carinata	Hasta 50 %

Fuente: Elaborado con base en RSB 2020.

Ilustración 17. Materias primas y rutas tecnológicas dirigidas a la producción de biocombustibles para aviación.



Nota: * La ATJ puede ser a base de isobutanol o etanol.

** Dos vías utilizan la tecnología FT (FT-SPK y FT-SPK/A).

La búsqueda de la descarbonización del transporte aéreo es una realidad sin retorno. El uso de biocombustibles en la aviación será un elemento más en un abanico de medidas para alcanzar las metas ambientales planteadas. La elección de las diferentes alternativas, en general, y de los biocombustibles para aviación, en particular, tendrá un fuerte componente local basado en el mapa de generación de biomasa y su tasa de reproducción, el grado de descentralización de la oferta energética y la capacidad de instalar/operar estas vías de producción, entre otras cuestiones.

Biocombustibles marinos

Según Kass *et al.* (2018), más del 90 % de las mercancías enviadas en el mundo viajan en buques de carga marítimos propulsados por motores de combustión interna que utilizan principalmente fueloil pesado (HFO) residual de bajo costo con un elevado contenido de azufre. Asimismo, el transporte marítimo es la mayor fuente de emisiones antropogénicas de azufre y es una fuente importante de otros contaminantes, incluidos material particulado, óxidos de nitrógeno y dióxido de carbono (CO₂). De acuerdo con la Organización Marítima Internacional (OMI) (2018), las emisiones del transporte marítimo internacional constituyen el 2.2 % de las emisiones antropogénicas globales³⁵, debido a lo cual la OMI, el organismo rector de la ONU para las operaciones marítimas internacionales, estableció requisitos agresivos de calidad del combustible para cumplir los objetivos de emisión, a fin de reducir el contenido global de azufre del combustible marino del 3.5 % al 0.5 % en peso a partir de 2020. El límite de azufre se reduce al 0.1 % para los barcos que operan en las regiones costeras de los Estados Unidos y el norte de Europa (conocidas como áreas de control de emisiones). En contraste, el combustible diésel para carreteras tiene un límite de azufre de 15 ppm o de 0.0015 %.

Adicionalmente, la OMI (2018) se ha comprometido a reducir las emisiones de GEI generadas por el transporte marítimo internacional y tiene como objetivo eliminarlas lo antes posible durante este siglo. Esta es la visión de la estrategia inicial sobre la reducción de las emisiones de GEI de los buques, adoptada en abril de 2018.

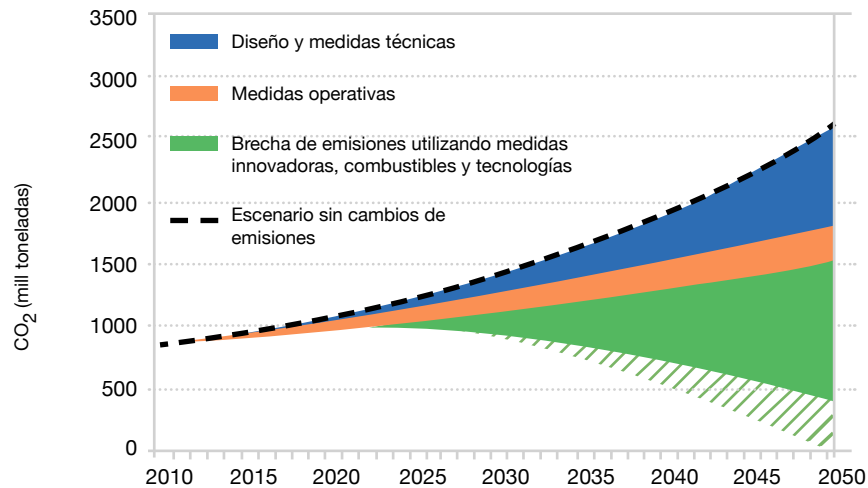
Entre los objetivos planteados se incluyen:

- Reducir las emisiones de CO₂ por trabajo de transporte (intensidad de carbono), como promedio de todo el transporte marítimo, al menos 40 % en 2030 y continuar los esfuerzos para lograr una disminución del 70 % en 2050, en comparación con las de 2008.
- Por primera vez, disminuir las emisiones totales anuales de GEI del transporte marítimo internacional en al menos 50 % en 2050, con respecto a 2008, al mismo tiempo que se prosigue con los esfuerzos para eliminarlas gradualmente, de conformidad con los objetivos del Acuerdo de París.

³⁵ Medición realizada para 2012.

Para ello, se desarrolló una estrategia con una amplia lista de medidas a corto, mediano y largo plazos, que incluye mejoras tecnológicas y operacionales, planes de acción nacionales, una mayor cooperación técnica, actividades portuarias, investigación y desarrollo, apoyo a la utilización de (bio) combustibles alternativos bajos en carbono y sin carbono, mecanismos de reducción de emisiones, etc. En tal sentido, Chia-Wen y Claus (2017) señalan que el uso de biocombustibles en el transporte marítimo es una oportunidad para reducir las emisiones de GEI y mejorar la calidad del aire, dado que las materias primas para biocombustibles contienen muy poco o no contienen azufre.

Ilustración 18. Ruta general de la OMI para lograr los objetivos de reducción de emisiones de GEI.



Fuente: Tomado de OMI 2018.

En cuanto al uso de biocombustibles bajos en carbono para la navegación, de acuerdo con Lehto *et al.* (2013), el bioaceite, procedente de una pirólisis rápida, aparece como el sustituto o complemento natural del fueloil marino. Se trata de una sustancia líquida combustible obtenida a través de la pirólisis y/o licuefacción de la biomasa. Como el proceso de pirólisis es el más habitual, también se le denomina bioaceite de pirólisis.

El bioaceite tiene ventajas medioambientales con respecto a los combustibles fósiles. Es neutro en CO₂ y GEI, por lo tanto, puede producir créditos de dióxido de carbono. No genera emisiones de SO_x porque la biomasa vegetal contiene pequeñísimas cantidades de azufre y, por consiguiente, su uso no se tiene que enfrentar a las tasas de SO_x (Suffo Aguilar 2015).

Según Machado (2010), la pirólisis es un proceso físico-químico en el que la biomasa se calienta a temperaturas relativamente bajas (500-800 °C), formando un residuo sólido rico en carbono (carbón) y una fracción volátil compuesta de gases y vapores orgánicos condensables (licor piroleñoso). La proporción de estos compuestos depende del método de pirólisis empleado, los parámetros del proceso y las características de la materia prima. Este proceso se desarrolla en tres etapas principales:

1. La primera ocurre entre la temperatura ambiente y los 180 °C. La biomasa absorbe el calor, liberando la humedad en forma de vapor de agua. Entre 110 y 180 °C se producen reacciones de deshidratación que involucran los grupos –OH presentes en las moléculas de los polisacáridos.
2. La segunda etapa tiene lugar entre los 180 y los 370 °C, cuando comienzan las reacciones propias de la pirólisis. Entre los 180 y los 290 °C sucede la degradación de la hemicelulosa y, parcialmente, de la celulosa y la lignina. A partir de los 250 °C, las reacciones que absorbían calor (endotérmicas) pasan a liberarlo (exotérmicas) y, a los 290 °C, se alcanza la tasa máxima de degradación de la hemicelulosa. Entre los 290 y los 370 °C ocurre la total degradación de la celulosa, cuya tasa máxima se logra a los 370 °C. En esa fase ocurre la ruptura de los ligamentos glicosídicos de los polisacáridos, dando lugar a una gran emisión de volátiles, compuestos por vapores orgánicos y altas concentraciones de CO, H₂, CH₄ y CO₂, con una gran formación de ácido acético, metanol y acetona. El alquitrán comienza a volverse predominante con el aumento de la temperatura.
3. La tercera etapa se desarrolla por encima de los 370 °C, cuando se completa la degradación de la lignina (Luengo *et al.* 2008).

La ruta tecnológica alternativa es la licuefacción directa de la biomasa, es decir, la obtención de líquidos (bioaceites) a partir de materiales lignocelulósicos. Se realiza mediante un tipo de hidrogenación en que la materia orgánica se mezcla con un solvente en presencia de un catalizador a alta presión (50-200 atm) y a una temperatura relativamente baja (250-450 °C). El bioaceite producido por la licuefacción posee un menor contenido de oxígeno y, consecuentemente, mayor energía que el derivado de la pirólisis. La biomasa es triturada en una faja granulométrica, una vez escogida y mezclada con algún solvente, formando una suspensión con 10 a 30 % de sólidos. Se puede agregar un catalizador a la suspensión. El proceso puede tomar de unos cuantos minutos a algunas horas. El procesamiento a alta presión en que ocurre la licuefacción conlleva algunas dificultades técnicas y un alto capital de inversión (Hamelinck y Faaij 2006).

Además del bioaceite obtenido por medio de las rutas tecnológicas de pirólisis o licuefacción, otros tipos de biocombustibles se pueden emplear en la navegación. Kass *et al.* (2018) describen siete tipos de combustibles producidos a base de diferentes tipos de biomasa, con distintas etapas comerciales y diversas ventajas y desventajas. A continuación, se presenta una breve reseña de ellos:

Tabla 2. Diferentes combustibles biológicos utilizables en el sector marítimo.

Tipo de combustible	Materia prima	Disponibilidad	Ventajas	Desventajas
Biodiésel o ésteres metílicos de ácidos grasos	Aceites vegetales y grasas animales	Comercial	<ol style="list-style-type: none"> 1. Miscible con gasoil marino 2. Con madurez tecnológica 3. Aprobado su uso con gasoil marino (nivel de mezcla de 7 %) 	Estabilidad de oxidación y vida útil
Aceite vegetal puro	Aceites vegetales	Comercial, pero se requiere investigar sobre su uso marino	Relativamente barato	Estabilidad de oxidación y vida útil
Diésel renovable	Aceites vegetales y grasas animales	Comercial	<ol style="list-style-type: none"> 1. Miscible con gasoil marino 2. Con madurez tecnológica 3. Con excelentes propiedades de combustión 4. Contiene cerca de cero O₂ 	Altos costos de producción
Diésel Fischer-Tropsch	Biomasa leñosa y de otros tipos	Comercial, pero actualmente no producido a base de biomasa	<ol style="list-style-type: none"> 1. Miscible con gasoil marino 2. Con excelentes propiedades de combustión 	Procesamiento complejo y caro
Bioaceite de pirólisis rápida	Biomasa leñosa y de otros tipos	Comercial	<ol style="list-style-type: none"> 1. Posible baja formación de material particulado 2. Miscible con butanol y mezclas de butanol 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Incompatibilidades con la infraestructura 2. Inmiscibilidad con gasoil marino puro

Tipo de combustible	Materia prima	Disponibilidad	Ventajas	Desventajas
Biocrudo de licuefacción hidrotermal	Biomasa leñosa y de otros tipos	En etapa de investigación	Valor de calentamiento mejorado en comparación con el bioaceite de pirólisis rápida	Solamente en escala de demostración
Mejorado de bioaceite de pirólisis rápida o biocrudo de licuefacción hidrotermal		En etapa de investigación	<ol style="list-style-type: none"> 1. Miscible con gasoil marino 2. Buen valor de calentamiento 	Solo en escala experimental
HFO	Petróleo crudo	Comercial	<ol style="list-style-type: none"> 1. Bajo costo 2. Con madurez tecnológica 3. Infraestructura disponible 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Altas emisiones de óxido de azufre (SO_x) y de material particulado 2. Procesamiento a bordo requerido 3. No renovable

Fuente: Tomado de Kass *et al.* 2018.

Como se puede observar, los biocombustibles marinos no se limitan al bioaceite y presentan un grado distinto de desarrollo con diversas ventajas y desventajas. La búsqueda de la reducción de emisiones de GEI, azufre y otros compuestos contaminantes es un gran incentivo para introducirlos en la matriz de combustibles marinos.

Ideas destacadas:

1. La diversificación del uso integral y eficiente de la biomasa para producir biocombustibles contribuye a la reducción de GEI, genera valor agregado y empleo y puede contribuir a que los sistemas agroalimentarios sean más eficientes y seguros. Se pueden distinguir cuatro tipos básicos de biocombustibles líquidos, dependiendo de si se utilizan en el transporte terrestre en motores ciclo diésel u Otto o en transporte marino.
2. En el transporte terrestre, en motores de ciclo diésel, se utiliza el biodiésel como un combustible biológico análogo al diésel fósil. Debido a sus similares propiedades físicas y químicas, puede reemplazarlo o mezclarse con él. Generalmente es producido a base de aceites vegetales de palma, soja y colza. Los procesos productivos que dan origen a estos tres tipos de aceite también originan distintos subproductos alimenticios, de fibras y energía. Además, se pueden utilizar otras materias, destacándose el aceite vegetal usado, el cebo vacuno y otros aceites vegetales.
3. El bioetanol es un alcohol etílico derivado de la fermentación de materias primas de alto contenido de azúcar (como la caña de azúcar o la remolacha azucarera), de cereales (como el maíz) y de productos lignocelulósicos derivados de la biomasa. Se puede usar en motores de combustión ciclo Otto en mezclas con las gasolinas o directamente, en reemplazo de estas. El maíz y la caña de azúcar representan el 90 % de las materias primas utilizadas y generan una serie de coproductos alimentarios y energéticos, entre otros.
4. Los biocombustibles para aviación o *biojet* son combustibles renovables que se pueden mezclar con los combustibles fósiles para aviación. Existen principalmente tres familias de materias primas biológicas que se pueden emplear en la producción de combustibles alternativos para aviones: la de los aceites y grasas o triglicéridos, la de los azúcares y la de materias primas lignocelulósicas. Hay siete rutas tecnológicas aprobadas para la obtención de biocombustibles de aviación.
5. En cuanto al uso de biocombustibles bajos en carbono para la navegación, el bioaceite, procedente de pirolisis rápida, aparece como el sustituto o complemento natural del fueloil marino. Sin embargo, hay al menos siete tipos de combustibles producidos a base de diferentes tipos de biomasa, en distintas etapas comerciales y con diversas ventajas y desventajas, que se pueden utilizar en la navegación. Los biocombustibles marinos no se reducen al bioaceite y presentan grados distintos. La búsqueda de la reducción de emisiones de GEI, azufre y otros compuestos contaminantes son un gran incentivo para introducirlos en la matriz de combustibles marinos.

Bibliografía consultada

- AFDC (Centro de Datos de Combustibles Alternativos y Vehículos Avanzados, Estados Unidos de América). 2021. Renewable hydrocarbon biofuels (en línea). Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en https://afdc.energy.gov/fuels/emerging_hydrocarbon.html.
- AIE (Agencia Internacional de la Energía, Francia). 2019a. Are aviation biofuels ready for take off? (en línea). París. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://www.iea.org/commentaries/are-aviation-biofuels-ready-for-take-off>.
- AIE (Agencia Internacional de la Energía, Francia). 2019b. World energy balances 2019 (en línea). París. Consultado 21 ene. 2020. Disponible en <https://webstore.iea.org/world-energy-balances-2019>.
- ARPEL (Asociación Regional de Empresas de Petróleo y Gas Natural en Latinoamérica y el Caribe, Uruguay); IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, Costa Rica). 2009. Manual de biocombustibles. Montevideo, Uruguay.
- ATAG (Grupo de Acción del Transporte Aéreo, Suiza). Aviation industry reducing its environmental footprint (en línea). Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en: <https://aviationbenefits.org/environmental-efficiency/climate-action/>.
- Baumol, W; Willing, R; Panzar, J. 1988. Contestable markets and the theory of industrial structure. California, Estados Unidos de América, HBJ.
- BNDES (Banco Nacional de Desarrollo Económico y Social, Brasil). 2008. Bioetanol de caña de azúcar: energía para el desarrollo sostenible. Río de Janeiro, Brasil, CGEE.
- BP (British Petroleum, Reino Unido). 2020. Statistical review of world energy 2019. Londres.
- Chia-Wen, C; Claus, F. 2017. Biofuels for the marine shipping sector: an overview and analysis of sector infrastructure, fuel technologies and regulations. Francia, AIE.
- Chum, HL; Nigro, FEB; McCormick, R; Beckham, GT; Seabra, JEA; Saddler, J; Tao, L; Warner, E; Overend, RP. 2015. Conversion technologies for biofuels and their use (en línea). Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en http://bioenfapesp.org/scopebioenergy/images/chapters/bioen-scope_chapter12.pdf.
- Hamelinck, CN; Faaij, APC. 2006. Outlook for advanced biofuels. Energy Policy 34(17):3268–3283.
- IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, Costa Rica) 2010. Atlas de la agroenergía y los biocombustibles en las Américas: II Biodiésel. (en línea). San José, Costa Rica, IICA. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <http://repiica.iica.int/docs/B1884e/B1884e.pdf>

- IRENA (Agencia Internacional de las Energías Renovables, Emiratos Árabes Unidos). 2020. Global renewables outlook: energy transformation 2050 (en línea). Abu Dabi. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Apr/IRENA_Global_Renewables_Outlook_2020.pdf.
- Kass, M; Abdullah, Z; Bidy, M; Drennan, C; Hawkins, T; Jones, T; Holladay, J; Longman, D; Newes, E; Theiss, T; Thompson, T; Wang, M. 2018. Understanding the opportunities of biofuels for marine shipping (en línea). Springfield, Estados Unidos. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://info.ornl.gov/sites/publications/Files/pub120597.pdf>.
- Lachman, J; Bisang, R; Obschatko, E; Trigo, E. 2020. Bioeconomía: una estrategia de desarrollo para la Argentina del siglo XXI (en línea). Buenos Aires, Argentina. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/12478/BVE20108164e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Lehto, J; Oasmaa, A; Solantausta, Y; Kytö, M; Chiaramonti, D. 2013. Fuel oil quality and combustion of fast pyrolysis bio-oils (en línea). VTT Technology 87. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2013/T87.pdf>.
- Luengo, CA; Felfli, FF; Bezzon, G. 2008. Pirólise e torrefação de biomassa. In Barbosa Cortez, LA; Lora, EES; Gómez, EO. Biomassa para energia. Campinas, UNICAMP, p. 333-351.
- Machado, CMM. 2010. Situación de los biocombustibles de 2.da y 3.era generación en América Latina y Caribe (en línea). Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/old0155.pdf>.
- MASBI (Midwest Aviation Sustainable Biofuels Initiative). 2013. Fueling a sustainable future for aviation (en línea). Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en http://www.masbi.org/content/assets/MASBI_Report.pdf.
- OACI (Organización de Aviación Civil Internacional, Canadá). 2013. Informe anual del Consejo 2010 en línea). Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en https://www.icao.int/publications/Documents/9952_es.pdf.
- OMI (Organización Marítima Internacional, Reino Unido). 2015. Third IMO greenhouse gas study 2014 (en línea). Londres. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://greenvoyage2050.imo.org/wp-content/uploads/2021/01/third-imo-ghg-study-2014-executive-summary-and-final-report.pdf>.
- OMI (Organización Marítima Internacional, Reino Unido). 2018. IMO action to reduce greenhouse gas emissions from international shipping: implementing the initial IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships (en línea). Londres. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/HotTopics/Documents/IMO%20ACTION%20TO%20REDUCE%20GHG%20EMISSIONS%20FROM%20INTERNATIONAL%20SHIPPING.pdf>.

- RSB (Mesa Redonda sobre Biomateriales Sostenibles, Suiza). 2020. Descarbonising aviation: the sustainable way forward (en línea). Ginebra, Suiza. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://rsb.org/wp-content/uploads/2020/06/RSB-Alternative-Aviation-Fuels-A-Sustainable-Future-is-Taking-Off.pdf>.
- SAFAANZ (Alianza de Australia y Nueva Zelanda para el Uso de Combustible Sostenible en la Aviación). 2020. Bioenergy Australia: technology investment roadmap, June 2020 (en línea). Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://cdn.revolutionise.com.au/cups/bioenergy/files/qsrtpd2f9mjkeie.pdf>.
- Suffo Aguilar, JJ. 2015. Estado del arte de la integración del aceite de pirólisis en refinerías petrolíferas convencionales. España, Universidad de Sevilla.
- Torroba, A. 2020a. Atlas de los biocombustibles líquidos 2019-2020 (en línea). San José, Costa Rica, IICA. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/13974/BVE20128304e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Torroba, A. 2020b. Los biocombustibles líquidos en las Américas: situación actual y potencial de desarrollo (en línea). San José, Costa Rica, IICA. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/9975/BVE20058034e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Trigo, E; Chavarría, H; Pray, C; Smyth, SJ; Torroba, A; Wesseler, J; Zilberman, D; Martínez, J. 2021. The bioeconomy and food systems transformation: food systems summit brief (en línea). Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en https://sc-fss2021.org/wp-content/uploads/2021/03/FSS_Brief_Bioeconomy_and_Food_Systems_Transformation.pdf.
- USDOE (Departamento de Energía de los Estados Unidos). 2020. Sustainable aviation fuel: review of technical pathways (en línea). Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://www.energy.gov/sites/default/files/2020/09/f78/beto-sust-aviation-fuel-sep-2020.pdf>.
- Wang, WC; Tao, L; Markham, J; Zhang, Y; Tan, E; Batan, L; Warner, E; Bidy, M. 2016. Review of biojet fuel conversion technologies (en línea). NREL. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/66291.pdf>.

Capítulo 3. La institucionalidad de los biocombustibles

¿Cómo se establece la institucionalidad en materia de biocombustibles? ¿Cuáles son los actores públicos o privados que suelen intervenir en el desarrollo de mercados de biocombustibles líquidos? ¿Cuáles son los temas clave y los diferentes mecanismos de articulación de las políticas públicas? ¿Cuáles son los pilares argumentales sobre los cuales se formulan políticas públicas y se promueve el uso de los biocombustibles líquidos?

En relación con las preguntas planteadas, cabe destacar que el establecimiento de la institucionalidad en torno a los biocombustibles líquidos supone la intervención de una serie de actores relevantes en los procesos de sensibilización, difusión, desarrollo de capacidades y articulación en la formulación y aplicación de políticas públicas y marcos normativos.

A pesar de que las políticas públicas y los procesos de su formulación pueden diferir en los diversos países, suelen encontrarse rasgos distintivos que permiten agruparlos y categorizarlos. El primero de ellos se refiere a los actores intervinientes. Como se verá, la temática de los biocombustibles suele trascender la articulación tradicional de las oficinas públicas, convirtiéndose en un tema transversal, debido no solo a la formulación de las políticas públicas, sino también a la necesidad de normar temas diversos.

En el presente capítulo se describirán todos los factores interrelacionados en el establecimiento de la institucionalidad en materia de biocombustibles líquidos: los actores intervinientes, los temas por normar y los mecanismos que articulan las políticas públicas, además de repasar los principales fundamentos de su promoción.

a) Mapa de actores

Con respecto a los actores públicos relevantes en materia de biocombustibles, varias instancias gubernamentales abarcan temas transversales, con distintos ámbitos de competencia y autoridad. Frecuentemente, se pueden observar los siguientes:

- Los ministerios o las secretarías de Energía³⁶ que anteriormente se orientaban al campo de los hidrocarburos y que ahora incursionan –no sin tensiones internas- en el de las bioenergías. Por lo general, los principales temas incluidos en sus agendas son:
 - Los sistemas de precios –en los distintos eslabones de la cadena, que va de la generación al consumo- y la comparación de precios/costos de aquellos de base fósil frente a los renovables;
 - Las condiciones de seguridad en torno a la producción, el transporte, la comercialización y el uso;
 - Las mezclas de biocombustibles en combustibles fósiles;
 - Las especificaciones de calidad;
 - La seguridad de las plantas; y
 - Los diversos mecanismos de promoción implícitos y/o explícitos en cada caso a través de la habilitación de normas técnicas.

³⁶Véase IICA 2021.

- Los ministerios de Agricultura e instituciones complementarias (agencias de desarrollo rural e institutos de investigación y desarrollo (IyD), entre otros) que, habiendo sido establecidas bajo la asociación agroalimentaria, ahora ven ampliada su agenda con la incorporación del uso de granos y otras biomásas en la generación de energía, por lo que deben abordar estos nuevos temas:
 - Las relaciones precios/costos entre ambos destinos;
 - Las variaciones en los esquemas productivos por el “efecto energía” (desde qué producir hasta el impacto en los costos de producción, influidos por la bioenergía de generación propia y/o de terceros o por los bioinsumos);
 - Las aprobaciones y los reglamentos en materia de genética vegetal para destinos específicos;
 - El ordenamiento territorial por la expansión de fronteras, dadas las presiones en la agricultura para abastecer biomasa destinada a alimentos y energía; y
 - El desarrollo de nuevos cultivos.
- Los ministerios de Producción y sus organismos técnicos asociados (especialmente los institutos de IyD y de tecnología industrial) en temas relacionados con:
 - Los aspectos técnicos de la producción de motores y otros equipos que pueden verse afectados por los biocombustibles, así como de la instalación y el mantenimiento de líneas (de diversas tensiones) y de las estaciones transformadoras y otros equipos en los que influye el uso de biocombustibles;
 - El desarrollo de empresas de biocombustibles como un nuevo sector industrial: el proceso de craqueo del grano genera múltiples subproductos susceptibles de posteriores procesos de transformación industrial³⁷; y
 - Los sistemas de promoción industrial para fortalecer/impulsar el establecimiento de instalaciones productivas.
- Ministerios de Economía y/o Finanzas. En este caso, los temas de la agenda suelen ser:
 - El costo fiscal y los eventuales beneficios impositivos asociados con los sistemas de promoción del desarrollo de bioenergías;
 - La carga fiscal –por acción u omisión- que tributan estos bienes en el mercado interno o en operaciones externas;
 - La creación o la modificación de impuestos sobre los combustibles fósiles y biocombustibles, en respuesta a las demandas medioambientales globales (impuesto al CO₂, mercados de carbono, etc.)
 - La situación de la oferta/demanda interna y su impacto en la balanza comercial, así como la sustitución de importaciones por la producción de biocombustibles locales; y
 - Los programas provinciales/municipales, mediante sus regulaciones territoriales con respecto al uso de biocombustibles, la captura de biomasa para su desarrollo, etc., en los que se destacan las normativas y/o las facilidades locales en torno al desarrollo de circuitos locales de captura de biocombustibles³⁸ y/o de bioenergías aplicados a sistemas locales de distribución.

³⁷Así como el craqueo del petróleo dio lugar a la industria petroquímica –y a los combustibles- el craqueo de la biomasa (granos y otros) abre posibilidades a la llamada química verde.

³⁸ Captura/separación de residuos domiciliarios y su transformación en biogás o biodiésel para la generación de electricidad para redes locales y/o el transporte público de pasajeros locales (o para el uso de vehículos del municipio).

- Otras instancias estatales:
 - Ministerios/secretarías de Ambiente: regulan las normas de emisiones de gases de caño de escape; y
 - Ministerios de Relaciones Internacionales que participan en negociaciones, por ejemplo, en relación con las barreras arancelarias impuestas por los países desarrollados al ingreso de biocombustibles provenientes de países de la región y otros aspectos técnicos y comerciales.

La variación en la centralización de las regulaciones y políticas públicas de los países puede brindar diferentes grados de competencia a los estados subnacionales sobre aspectos que aquí se atribuyen a los gobiernos de los Estados nacionales.

Además de los actores públicos, se destacan los privados, que desarrollan inversiones en las distintas actividades de producción, transporte, distribución, almacenamiento y análisis de los biocombustibles³⁹. Ellos se complementan con las organizaciones no gubernamentales (ONG) y asociaciones sin fines de lucro interesadas en los combustibles biológicos. En ocasiones, estas organizaciones han impulsado significativamente el desarrollo de políticas de biocombustibles y algunas de ellas tienen objetivos medioambientales vinculados.

Asimismo, universidades y centros de investigación se han sumado a la institucionalidad de los biocombustibles en su tarea de estudio de diferentes aspectos económicos, ambientales y de salud asociados a estos.

Muchos de los actores mencionados forman parte del Grupo Impulsor de los Biocombustibles (GIB)⁴⁰. Un grupo impulsor es un conjunto de recursos humanos involucrados en este campo. Constituye el ámbito primario y punto de partida desde el cual los formuladores de políticas desarrollan sus actividades en la materia y con los cuales interactúan las instancias privadas.

Cualquiera que sea el formato inicial, el GIB se convierte en un agente clave por establecer, desarrollar y/o fortalecer (según el caso) en las primeras etapas de desarrollo de los biocombustibles. De acuerdo con la revisión de distintas experiencias, algunos rasgos de la estructura y el funcionamiento de un GIB son los siguientes:

- Se trata de grupos reducidos con una alta formación técnica, perfiles interdisciplinarios y programas de trabajo estables de mediano plazo;
- Están anclados en los organigramas de la Administración Pública sobre temas vinculados a los biocombustibles (ministerios de Energía, Agricultura, Ambiente, etc.)

³⁹Entre los actores privados se destacan los productores y refinadores de petróleo (empresas privadas, públicas o mixtas). Este grupo tiene particular interés en la formulación de políticas para productos que pueden sustituir sus ventas. Muchas empresas petroleras se han acoplado a la cadena de los biocombustibles, integrándose a lo largo de las diferentes etapas del negocio. Con el objetivo de dejar de ser empresas petroleras para reconvertirse en empresas de energía con compromisos medioambientales, una parte de la industria petrolera se ha volcado a la conversión de sus refinerías para producir biocombustibles.

Otros actores privados interesados en la evolución de la política de biocombustibles son las compañías automotrices, interesadas en las especificaciones finales de combustibles para motores.

⁴⁰Término análogo de GIB en el IICA (2021).

- Funcionan como un reservorio de contactos técnicos y políticos de otras instancias de la gestión pública y son un punto focal de programas de cooperación de agencias internacionales (lo que permite intercambiar experiencias, desarrollar programas, recopilar información, etc.). Sus interlocutores se ubican en las seis áreas de la bioeconomía, tanto en temas generales como específicos; y
- Recopilan y producen información sobre diversos aspectos; pueden constituir un observatorio de referencia en materia de biocombustibles al cual pueden recurrir los —actuales y futuros— integrantes del sistema.

Ideas destacadas

1. En lo relativo a los actores públicos relevantes en la institucionalidad de los biocombustibles, varias instancias gubernamentales abarcan temas transversales, con distintos ámbitos de competencia y autoridad. En general, suelen intervenir ministerios (o secretarías) de Energía, Agricultura, Producción, Economía y Ambiente, entre otras.
2. La variación en la centralización de las regulaciones y políticas públicas de los países puede proporcionar diferentes grados de competencia a los estados subnacionales.
3. Además de los actores públicos, se destacan los privados, que realizan inversiones en las distintas actividades de producción, transporte, distribución, almacenamiento y análisis de los biocombustibles. Ellos también se complementan con las ONG y asociaciones sin fines de lucro interesadas en los combustibles biológicos.
4. Por su parte, las universidades y los centros de investigación se han sumado a la institucionalidad de los biocombustibles en su tarea de estudio de diferentes aspectos económicos, ambientales y de salud vinculados a estos.
5. Muchos de los actores, especialmente en las primeras etapas de desarrollo de los biocombustibles en un país, suelen confluir en un GIB, es decir, en un conjunto de recursos humanos que contribuyen a la sensibilización y difusión en torno a los biocombustibles y a la formulación y aplicación de políticas públicas en la materia.

b) Temas claves por normar: la creación de mercados y normas asociadas

Según Bisang y Torroba (2020), los mercados se establecen como creaciones sociales en las que intervienen el Estado, empresas, organizaciones intermedias y consumidores en diferentes roles de concurrencia y contrapeso. Al respecto, Bianchi (1995) afirma que “El mercado como elemento distribuidor de los recursos es una institución muy compleja, cuyo funcionamiento requiere la definición de normas de comportamiento y la especificación de reglas de convivencia poco naturales”. Por su parte, Schumpeter (1934) destaca el rol del emprendedor como impulsor inicial de nuevos modelos de producción e intercambio, cuando se trata de fuertes disrupciones en las reglas previas de mercado. Este fija distintas etapas —desde la inicial coexistencia de ambas tecnologías, hasta la consolidación de un nuevo mercado, pasando por fases intermedias de monopolios tecnológicos con altas tasas de ganancia que difunden el nuevo paradigma. Otros autores señalan que, a partir del impulso tecnológico inicial, se modelan instituciones en el marco de una coevolución de temas de mercado, regulaciones e instituciones públicas y privadas (Nelson 1994, Pérez 2010, Oliveira *et al.* 2017).

En tal sentido, las políticas públicas se enfrentan al desafío de la creación de nuevos mercados y, en forma asociada, a la formulación y el establecimiento de normas relativas a los nuevos productos (los biocombustibles). A continuación, se detallan los aspectos regulatorios más comunes en la fijación de políticas públicas de biocombustibles que promueven el desarrollo de estos mercados:

- Mezclas. El principal mecanismo en el desarrollo de mercados de biocombustibles es la determinación como mandatorias o libres de las mezclas autorizadas. En este sentido, los dos mecanismos que se destacan son:

- Mezclas mandatorias: según Torroba (2020a), la obligación de mezclar biocombustibles con combustibles fósiles se cumple de diferentes maneras.

- La práctica más difundida es el “mandato de mezcla obligatoria”, en los ámbitos nacional y subnacional (estados, departamentos, provincias, etc.) de bioetanol con gasolinas y de biodiésel con diésel fósil. Dichas mezclas suelen expresarse en unidades volumétricas (mezclas volumen/volumen) o como unidades energéticas (mezclas de energía/energía).

- La obligatoriedad de usar biocombustibles también se establece por medio de “mandatos generales” de mezcla de biocombustibles con combustibles fósiles. Dichas obligaciones se cumplen en forma agregada, independientemente del tipo de biocombustible utilizado.

- Un mecanismo adicional consiste en fijar metas de reducción de GEI y, en forma asociada, promover el uso de biocombustibles para cumplirlas.

Ello constituye una reserva explícita durante lapsos predefinidos para “establecer” el mercado y garantizar la demanda, a fin de reconfigurar e instalar el hábito de uso en el consumidor. Funcionalmente, ello implica una “ventana de acumulación” temporal que se vislumbra en el largo plazo con carácter circunstancial, hasta que el mercado se adapte a las nuevas condiciones de utilización masiva de los biocombustibles y la oferta realice el complementario “aprendizaje”, con las consecuentes reducciones de costos y adaptaciones a precios más competitivos.

- Mezclas no mandatorias. En este caso no existen obligaciones de uso de biocombustibles, pero se autorizan sus usos en “estado puro” o distintas mezclas. La autorización no obligatoria de su uso incentiva la competencia directa con los combustibles fósiles y otras fuentes a través de los precios.

- Funcionamiento del mercado. Se relaciona estrechamente con el plano de desarrollo de la industria (mercados promocionales, de transición o libres). Estos planos serán analizados en la siguiente sección. En forma adicional, la estructuración del mercado va a estar ligada directamente al establecimiento de mezclas mandatorias o no mandatorias. En el primer caso, los temas más relevantes en cuanto a normas son:

- Precios. Su definición se puede regir por un amplio abanico de esquemas. Los esquemas más extremos van desde su determinación por parte de la autoridad estatal de aplicación, hasta su definición libre.

- Cuotas. La legislación debe definir si las ventas de biocombustibles se realizarán con alguna “reserva” o “cuota” de mercado. Estas se pueden establecer para promover ciertos cultivos o características de empresas, lo que implica establecer regulaciones en las cantidades por comercializar.

- Impuestos. Se deben definir los impuestos que tributarán los biocombustibles en relación con sus sustitutos fósiles. Resultan especialmente interesantes aquellos mecanismos impositivos que reflejan las externalidades positivas de los biocombustibles en relación con los fósiles (p. ej., el impuesto al CO₂).

- Seguridad. A raíz del desarrollo de una nueva industria, resulta necesario establecer las pautas específicas de seguridad a lo largo del proceso de construcción y operación de las plantas de producción, almacenamiento y mezcla de biocombustibles. Dichas pautas buscan preservar la seguridad de las personas, los bienes y la sostenibilidad ambiental.
- Calidad⁴¹. Se requiere formular las normas de calidad para los biocombustibles. La autoridad de aplicación debe definir sus valores y tolerancias y establecer los mecanismos de control de calidad de dichos productos en sus diferentes etapas de producción, mezcla y comercialización. Asimismo, resultará necesario modificar las normas finales de calidad para los combustibles líquidos.
- Normas de emisiones. Se puede requerir la recalibración de las normas de emisiones de gases contaminantes por el tubo de escape.
- Otros. Es posible establecer normativas adicionales, como por ejemplo, mecanismos de incentivo a la inversión en bienes de capital, nuevas tecnologías y/o promoción de nuevos cultivos energéticos.

Adicional y concurrentemente, Torroba (2020b) y Bisang y Torroba (2020) señalan que existen otros tres planos con diferentes mecanismos o esquemas de regulación de biocombustibles en virtud del nivel de desarrollo de la industria⁴².

- a) Mecanismos promocionales
- b) Marcos normativos de libre competencia
- c) Esquemas de transición desde mercados regulados y protegidos hacia otros de libre competencia con los productos fósiles e incluso entre los propios biocombustibles, según la fuente de biomasa utilizada.

a) **Mecanismos promocionales.** Los marcos normativos promocionales asumen que la industria de los biocombustibles puede contar con asimetrías internas (competencia de diferentes cultivos o escalas industriales) y externas frente a los combustibles fósiles. En tal sentido, cabe destacar que los biocombustibles son una industria relativamente nueva en casi todos los países, por lo que necesita tiempo para su promoción, a fin de que sus respectivas estructuras productivas sean competitivas. En este proceso resulta fundamental el desarrollo de economías de escala (y de scope), frente a una industria de refinación de petróleo madura con más de 200 años de historia.

Detrás de estos mecanismos está la noción de “industria infante”, bosquejada por Alexander Hamilton⁴³, así como el concepto de que, luego de un aprendizaje inicial y el desarrollo de escalas, la industria beneficiaria logra desarrollar su actividad sin la protección del Estado (List 1909). Varias son las herramientas utilizadas en este tipo de mecanismos.

La primera es el establecimiento de mezclas mandatorias de biocombustibles. En la mayoría de los países este tipo de medidas ha sido la piedra angular del desarrollo de la industria. Algunas legislaciones nacionales establecen que dichas mezclas deben ser abastecidas por la industria local, con el fin de asegurar un desarrollo industrial propio.

⁴¹En el anexo se detallan las principales especificaciones de calidad del biodiésel y del bioetanol combustible.

⁴²Para obtener más detalles conceptuales y empíricos de los tres mecanismos de regulación de biocombustibles, consúltese Bisang y Torroba 2020.

⁴³En su Reporte de Manufacturas de 1791. Véase un bosquejo de este en <https://press-pubs.uchicago.edu/founders/documents/v1ch4s31.html>.

Otra herramienta es el uso de las protecciones arancelarias; por ejemplo, los países del Mercado Común del Sur gravan el bioetanol con un derecho de importación del 20 %. Una variante alternativa –también sobre el comercio exterior– es el uso de tipos de derechos de exportación o cambios diferenciales –dependiendo de si se trata de una materia prima o de un producto terminado–.

Los marcos normativos promocionales suelen establecer sistemas de **precios regulados por la autoridad de aplicación**. Generalmente, estos esquemas de precios tienden a ser fijados con base en alguna regla predefinida. Lo más habitual es establecer algún esquema de *cost plus* o *price cup*⁴⁴, mediante fórmulas polinómicas que remuneran costos y aseguran una rentabilidad razonable⁴⁵. En algunos casos, las fórmulas tienen bandas superiores e inferiores con respecto a: a) la relación de precios preestablecida entre el resultado de la fórmula y los precios de frontera de la materia prima utilizada para producir biocombustibles; b) los precios internos de los sustitutos fósiles; c) los precios de frontera de los combustibles fósiles y/o los biocombustibles; d) los precios de paridades de frontera para los diversos combustibles; y e) los precios de combustibles alternativos de origen fósil.

Generalmente, esta forma centralizada de determinar los precios genera precios superiores a aquellos de mecanismos más libres, como los que se describirán más adelante, e implican tensiones entre los mercados de mezclas y los de origen fósil.

Las reglas de fijación de precios pueden ir variando a lo largo del tiempo en virtud de la evolución y las ganancias de productividad de la industria. Al igual que en los servicios públicos, los esquemas que fijan precios con fórmulas polinómicas suelen estar sujetos a revisiones técnicas para adaptarlos a la evolución de la industria.

En materia impositiva los biocombustibles suelen no estar gravados o poseer exenciones parciales o totales con respecto a los impuestos específicos que gravan los combustibles líquidos de origen fósil.

Finalmente, se destacan beneficios promocionales a las inversiones para establecer nuevas capacidades productivas por medio de tratamientos impositivos diferenciales y el acceso a financiamiento preferencial.

En síntesis, los marcos normativos promocionales de biocombustibles buscan desembocar en mecanismos de mercados más competitivos o en esquemas de transición hacia mercados menos regulados. Para ello, se valen de una serie de instrumentos que parten desde la fijación de mandatos obligatorios, cuotas de producción, precios fijados por la autoridad que garantizan la recuperación de los costos y ganancias razonables, hasta estructuras tributarias comparativamente menos gravadas en relación con los fósiles y mecanismos de incentivo a la inversión en biocombustibles.

⁴⁴Para obtener más detalles de la fijación de precios por medio de mecanismos regulatorios, consúltese Chisari y Ferro 2011.

⁴⁵Véase el cuadro de esta sección, donde se ejemplifica el diseño de una fórmula de precios.

Construcción de fórmulas de precios reguladas para la industria de los biocombustibles.

Los esquemas regulatorios que fijan los precios internos de los biocombustibles se enfrentan al desafío de regular precios de una industria con costos asociados de subproductos no regulados. Debido a ello, las autoridades de regulación pueden fijar los precios del biodiésel, pero no de la glicerina, así como el precio del bioetanol de maíz, pero no de los granos destilados que se producen en forma asociada. Lo mismo sucede con otros biocombustibles como el etanol de caña de azúcar.

En este cuadro se describirá la construcción de una fórmula genérica para la producción de biodiésel. Construcciones similares que siguen la misma lógica se pueden aplicar al bioetanol o a otros biocombustibles.

Los costos de las fórmulas se asocian a parámetros que pueden variar de acuerdo con varios criterios. Los insumos directos del bioetanol, como el aceite o el metanol, en el caso del biodiésel o el maíz, reflejan la eficiencia productiva según cuán cerca estén de los coeficientes estequiométricos, es decir, el número de moléculas de un determinado tipo que participa en una ecuación química. Por ejemplo, si para producir una unidad de biodiésel a partir de aceite de soja se necesitan estequiométricamente 0.11 unidades de metanol, mientras más cerca esté el parámetro de 0.11, mayor eficiencia productiva reflejará la regulación de la fórmula de precios.

A continuación, se describe una fórmula genérica que se puede aplicar al biodiésel.

a) Precio del biodiésel = (costo del aceite + costo del metanol + costo de la mano de obra + amortización del capital + resto de costos-subproductos)

Esta fórmula polinómica incluye los siguientes detalles, según cada término:

b) Costo del aceite = α *precio del aceite

Los precios del aceite suelen fluctuar entre las referencias de frontera (paridad de exportación o de importación) más costos asociados, como el transporte.

El parámetro α expresa el consumo específico de aceite necesario para producir una unidad de biodiésel.

c) Costo del metanol = β *precio del metanol

Como en el caso del aceite, el cálculo del precio del metanol para el mercado interno debe ser ajustado por el parámetro β , que refleja su consumo específico en el proceso productivo.

d) Costo de la mano de obra = μ *precio de la hora hombre

El precio de la hora hombre debe representar la media del precio (salario) por hora remunerativa dedicada a la industria en particular. En caso de que existan sindicatos en este sector, los acuerdos colectivos de trabajo suelen ser un buen indicador para acceder a esta información. Dicho precio debe multiplicarse por el parámetro μ , que debe reflejar la cantidad de horas hombre necesarias para producir una unidad de biodiésel.

e) Amortización del capital = precio de amortización

En el caso de la amortización del capital invertido, suele establecerse un valor que refleja la depreciación del capital durante un período dado.

f) Resto de costos = precio del resto de los costos

Como en el caso de la amortización, este concepto suele expresarse como un valor monetario que refleja todos los costos no comprendidos en los ítems anteriores (metilato de sodio, electricidad, gas natural, otros combustibles, etc.)

g) Subproductos = γ * ingresos por subproductos

Cuando la fórmula de precios tiene componentes no regulados, se puede introducir un descuento por el ingreso proveniente de los subproductos obtenidos. En este caso, el ingreso será el resultado de la cantidad de glicerina vendida a un determinado precio. Dicho descuento puede estar multiplicado por el parámetro γ , que se ubica entre 0 y 1. Este factor permite asociar una tasa de ganancia a los subproductos. De esta forma, si el factor es 1, entonces la empresa no tendrá ganancias asociadas a la venta del subproducto (solo recuperará los costos). Mientras más se aleje de 1, mayor será la tasa de ganancia.

Cabe destacar que la unidad de biodiésel puede expresarse como peso (tonelada, kilogramo) o como volumen (metro cúbico, litro). En contextos inflacionarios, algunos de los valores pueden ajustarse por distintos índices que reflejen dicho contexto. Por ejemplo, si se opta por asignar un precio fijo al concepto “resto de costos”, este puede ser actualizado por un índice que refleje el aumento de dicho rubro.

Esta fórmula solo refleja una metodología reproducible con respecto a otros biocombustibles. Su fórmula polinómica puede tener más o menos términos, de acuerdo con el grado de complejidad y la información de la cual disponga la autoridad de aplicación.

b) Marcos normativos de transición. Este tipo de esquemas suele aplicarse en los casos en los que, luego de una etapa de promoción previa, aún persisten asimetrías competitivas internas (entre distintas fuentes de producción de biocombustibles) y externas (frente a los competidores productores de combustibles fósiles). De esta forma, en este tipo de mecanismos se tiende a establecer mecanismos más competitivos y libres, pero contemplando medidas que aún brindan ventajas frente a los combustibles fósiles (o protecciones internas en torno a los biocombustibles).

De esta forma, los mecanismos de transición suelen ser un punto intermedio entre la competencia pura y los regímenes promocionales de los biocombustibles.

En cuanto a las mezclas de biocombustibles, caracterizadas como mandatorias en el caso de los mecanismos promocionales, se destaca una mayor flexibilidad en los mecanismos de transición. En particular, se observan tres tipos de esquemas: a) existencias de normativas duales, como mezclas mandatorias y un segmento libre a partir de determinado nivel⁴⁶; b) cortes obligatorios móviles, con bandas predefinidas⁴⁷; y c) mezclas obligatorias sujetas a requisitos vinculados con los precios.

⁴⁶De acuerdo con Torroba (2020a), en Brasil existe un rango de mezcla de bioetanol obligatorio de 18-27.5 %, además de la opción de vender bioetanol hidratado en estado puro. Asimismo, Estados Unidos, en cuanto a sus mezclas obligatorias de bioetanol, tiene habilitado un canal con surtidores flexibles que le permiten comercializar una mezcla de hasta el 85% de dicho biocombustible. Un caso similar al de Estados Unidos es el de Francia, donde se presentan mezclas libres similares.

⁴⁷En Brasil el bioetanol también se aplica a este tipo de esquema, al existir una banda de mezcla obligatoria que puede fluctuar entre 18 y 27.5 %.

En cuanto a los mecanismos de precios, la autoridad de aplicación suele abandonar las estructuras de fijación para migrar a esquemas más desregulados. Entre ellos se destacan dos:

-Las licitaciones impuras. Este tipo de mecanismo procura establecer mayores grados de competencia (respecto de la fijación de precios a través de fórmulas), pero estableciendo segmentos de competencia que participan en licitaciones diferenciadas, de conformidad con características prefijadas o con cupos mínimos de participación por segmento. Este tipo de licitaciones suele ser un escalón intermedio hacia licitaciones puras totalmente competitivas para el abastecimiento de una cuota de mercado.

-Las licitaciones puras. Las licitaciones puras son más competitivas que las impuras. Su objetivo es generar más mecanismos de competencia en compuestas de precio de un producto preestablecido y homogéneo y otras condiciones comerciales. Las licitaciones puras también se pueden aplicar en esquemas libres.

De acuerdo con Torroba (2020b), en materia impositiva, bajo este tipo de esquemas, los biocombustibles no suelen tributar la totalidad de los impuestos sobre los cuales están gravados los combustibles líquidos. La exención puede ser total o parcial; en este último caso, se trata de garantizar que se vean reflejadas las externalidades ambientales positivas de los biocombustibles. Para ello hay diferentes métodos, que van desde la utilización del impuesto al CO₂, como mecanismo de reconocimiento de las ventajas ambientales, hasta mecanismos indirectos como la política RenovaBio de Brasil.

De igual manera, tienden a disminuir o desaparecer los esquemas de promoción a las inversiones y créditos preferenciales.

A modo de resumen, los marcos normativos de transición tienden a reducir paulatinamente los esquemas de promoción y regulación anteriores, cuyo objetivo era establecer una nueva industria. Ello proporciona un horizonte temporal para que la industria creada bajo el esquema anterior termine de desarrollarse competitivamente. Los mecanismos de mezclas, cuotas y precios se flexibilizan, así como los aspectos tributarios e impositivos.

- **Marcos normativos libres o desregulados.** Bajo este tipo de esquemas, se asume que la industria de los biocombustibles tiene un elevado grado de desarrollo y competitividad para avanzar en mecanismos de libre competencia.

En cuanto a las mezclas, se avanza en el establecimiento de segmentos no mandatorios, con la posibilidad de que los biocombustibles puros (o mezclas muy elevadas) compitan con sus sustitutos fósiles. Estos segmentos libres pueden convivir con bases de mezclas obligatorias ya establecidas.

Los mecanismos habituales de competencia consisten en el establecimiento de precios libres, sin regulaciones ni esquemas intermedios. En ocasiones, se pueden aplicar licitaciones puras.

En materia impositiva y tributaria no suele haber esquemas de incentivo a la inversión. Sin embargo, muchas legislaciones buscan que las ventajas medioambientales de los biocombustibles se reflejen mediante impuestos al carbono diferenciales u otros mecanismos indirectos.

En resumen, generalmente se norman cuatro aspectos fundamentales de los biocombustibles: a) las mezclas; b) los mecanismos de precios; c) el régimen impositivo específico en comparación con los combustibles fósiles y d) el régimen tributario general (incluidos los aspectos impositivos y el financiamiento a la inversión en capital).

Además, en relación con los temas descritos anteriormente, se pueden aplicar tres tipos de esquemas regulatorios: a) de promoción, b) de transición y c) libres.

En el siguiente cuadro se esbozan los tres esquemas aplicados a los cuatro temas que generalmente se norman.

Tabla 3. Esquema de aplicación normativa en biocombustibles líquidos.

Tipo de esquema	Mezclas	Precios	Régimen impositivo sobre los biocombustibles	Esquema tributario general
Promoción	Obligatorias	Regulados (se garantiza su rentabilidad)	Exentos	Ventajas tributarias
Transición	Obligatorias / rangos	Licitaciones segmentadas	Exentos / parcialmente exentos	Marco general / leves ventajas
Desregulación	Rangos / biocombustibles puros	Licitaciones puras / libre fijación	Igualdad frente a los combustibles fósiles, considerando las externalidades (impuesto al CO ₂)	Marco general

Fuente: Elaborado con base en Torroba 2020b.

Ideas destacadas

1. Las políticas públicas en materia de biocombustibles se enfrentan al desafío de la creación de nuevos mercados y, de forma asociada, al establecimiento y la formulación de normas vinculadas a los nuevos productos.
2. Los mercados suelen establecerse por medio de mezclas de biocombustibles con combustibles fósiles. Estas pueden ser mandatorias (creándose una cuota de mercado) o no mandatorias (los biocombustibles compiten directamente con los sustitutos de origen fósil).
3. El funcionamiento del mercado de los biocombustibles está estrechamente vinculado al desarrollo de la industria y está regido por tres marcos normativos:
 - a. Promocionales. Buscan promocionar su consumo y producción.
 - b. De transición. Brindan algunos incentivos.
 - c. De libre competencia. Impulsan una estructura productiva desarrollada que compite libremente a través de mecanismos de mercados.
4. En virtud del tipo de marco normativo aplicado, las autoridades de regulación deberán normar: la definición de los precios de los biocombustibles mediante sus diferentes mecanismos (fórmulas, licitaciones, etc.), el establecimiento de cuotas específicas de mercado, la definición del marco impositivo aplicable, la seguridad y la calidad en cuanto a la producción y el consumo, y las emisiones.

c) Fundamentos para el establecimiento de políticas de biocombustibles

El establecimiento de normativas y políticas públicas, especialmente de los marcos promocionales, se fundamenta en los siguientes tres pilares, que no son mutuamente excluyentes y cuya importancia puede variar con el tiempo:

1) Aspectos medioambientales y de salud humana. Como se destacó en el primer capítulo, la reducción de las emisiones de GEI es una prioridad para disminuir sus efectos asociados al cambio climático. En este sentido, son varios los estados nacionales y subnacionales que están comenzando a apoyar la adopción de políticas vinculadas a los biocombustibles. Uno de los casos más destacados es el programa “Low Carbon Fuel Standard”, del estado de California, cuyo objetivo principal es reducir la intensidad de carbono de todos sus combustibles. En tal sentido, tiene una serie de mecanismos que priorizan a los biocombustibles bajos en carbono.

El campo ambiental también es prioritario en la política de biocombustibles de la Unión Europea (UE), que, por medio de la directiva 2009/30/CE, fija porcentajes obligatorios de reducción de las emisiones de los biocombustibles.

En diciembre de 2017 Brasil comenzó a considerar el eje ambiental, al establecer el programa RenovaBio en su Política Nacional de Biocombustibles, el cual se basa en objetivos anuales de reducción de emisiones de CO₂, con obligaciones directas para los distribuidores, incorporando certificados para los biocombustibles en virtud de la reducción de emisiones y créditos de descarbonización (Torroba 2020b).

El ámbito medioambiental reviste cada vez más relevancia en los distintos países que promueven los biocombustibles. Comienzan a destacarse las externalidades positivas asociadas a la disminución de emisiones de componentes de polución del aire perjudiciales para la salud humana. En este sentido, tal como se destaca en el capítulo uno, cada vez hay mayor evidencia científica de los efectos adversos en la salud humana de la polución derivada de la quema de hidrocarburos. A partir de los años noventa, en diversas regiones de Estados Unidos, el motivo principal para agregar etanol a la gasolina fue precisamente la mejora de la calidad del aire asociada a la oxigenación producida por el etanol (Yacobucci y Womach 2006). Además, este eje cada vez toma mayor relevancia en otros Estados, como los países de la UE, Canadá y la India.

2) La seguridad y la diversificación energética. Este pilar suele centrarse en el reemplazo del petróleo y los combustibles fósiles en países tradicionalmente importadores de crudo o sus derivados, con potencial para agroindustrializar sus excedentes de biomasa en forma de combustibles biológicos⁴⁸. Se destaca el caso de Estados Unidos, que promulgó en 2007 la Ley de Independencia y Seguridad Energética⁴⁹, en la cual uno de sus catorce títulos se orienta exclusivamente a brindar una mejor “seguridad energética a través de una mayor producción de biocombustibles”. Esta ley fue antecedida por la “Ley de Seguridad Energética” de 1980⁵⁰, que también incluía entre sus ejes a los biocombustibles, específicamente, al bioetanol.

De acuerdo con Stolf y Oliveira (2020), el programa de promoción del bioetanol de Brasil, denominado Proálcool, se implementó formalmente en 1975, como resultado de la fuerte alza en los precios internacionales del petróleo.

Asimismo, las actuales políticas de biocombustibles de Indonesia, Tailandia y Malasia se fundamentan en buena parte en aspectos de seguridad y diversificación energética.

3) El desarrollo agrícola y cuestiones económicas. Los países con grandes excedentes agrícolas suelen orientarlos a la producción y al consumo de biocombustibles. Naciones como Argentina, Brasil, Estados Unidos, Malasia, Indonesia, Tailandia y Colombia incluyen aspectos agrícolas entre sus principales fundamentos para el desarrollo de políticas públicas de biocombustibles, lo que permite canalizar los excedentes agrícolas, generando una demanda más estable de estos y, en forma asociada, produciendo beneficios económicos vinculados a la generación de empleo y al valor agregado. La generación de coproductos desempeña un rol complementario importante en esta cuestión. En forma adicional, dentro de este eje también se destaca el desarrollo de industrias en enclaves territoriales, donde lo rural comienza a fusionarse con lo urbano. Ello crea asentamientos demográficos que reequilibran la estructura territorial y productiva.

Como se mencionó previamente, los fundamentos de política pública no son excluyentes y su importancia relativa va variando con el paso del tiempo. En los últimos años los factores ambientales revisten una relevancia creciente a raíz de las nuevas exigencias en materia de descarbonización y calidad del aire.

⁴⁸Tras este concepto subyace la idea de la agroindustrialización para sustituir las importaciones.

⁴⁹Dicha ley se promulgó con el objetivo de “Llevar a los Estados Unidos hacia una mayor independencia y seguridad energética, aumentar la producción de combustibles renovables limpios, proteger a los consumidores, incrementar la eficiencia de los productos, edificios y vehículos, promover la investigación e implementar opciones de captura y almacenamiento de gases de efecto invernadero y mejorar el desempeño energético del Gobierno Federal, entre otros fines”. Está disponible en <https://www.govinfo.gov/content/pkg/PLAW-110publ140/pdf/PLAW-110publ140.pdf>.

⁵⁰Disponible en <https://www.govinfo.gov/content/pkg/STATUTE-94/pdf/STATUTE-94-Pg611.pdf>.

A continuación, se muestra el peso de cada uno de los fundamentos en las políticas de biocombustibles en una serie de Estados seleccionados:

Tabla 4. Peso de los diferentes fundamentos en el establecimiento de políticas públicas de biocombustibles.

Estados / tipos de fundamentos	Agrícola / económico	De seguridad energética	Ambiental	
			Calidad del aire	Descarbonización
Argentina	Eje central	Baja	No se aplica	Baja
Brasil	Eje central	No se aplica	No se aplica	Iniciando
California	No se aplica	No se aplica	Eje central	Eje central
Canadá	Fuerte	No se aplica	Creciente	Eje central
Colombia	Eje central	Baja	No se aplica	Iniciando
UE	Eje central	Disminuyendo	Eje central	Eje central
China	Creciente	No se aplica	Baja	No se aplica
India	Creciente	Creciente	Fuerte	Iniciando
Indonesia	Eje central	Fuerte	No se aplica	No se aplica
Malasia	Eje central	Fuerte	No se aplica	No se aplica
Perú	Eje central	No se aplica	No se aplica	Iniciando
Tailandia	Eje central	Fuerte	No se aplica	Iniciando
Estados Unidos	Eje central	Disminuyendo	Eje central	Creciente

Fuente: Elaborado con base en Sacoto 2021.

Siguiendo esta misma lógica, se pueden establecer diferentes tipos de países, de acuerdo con su potencial para desarrollar biocombustibles. En tal sentido, mientras mayor sea su disponibilidad de materias primas, más fuertes sean sus metas de reducción de GEI y de mejoramiento de la calidad del aire y más grande sea su posición como importador de petróleo y derivados, mayor será su potencial para desarrollar biocombustibles. En forma gráfica, mientras más alejados estén los tres vértices del centro del triángulo, mayor será el potencial del país.

Ilustración 19. Tipos de países en relación con su potencial de desarrollo de biocombustibles.



Estas tres categorías son las principales, pero no las únicas. Se podrían agregar otras, como el tamaño del sector financiero y su derrame en el sector productivo, el desarrollo del sector científico y tecnológico del país, la infraestructura necesaria para desarrollar nuevos negocios, etc.

Ideas destacadas

1. El establecimiento de normativas y políticas públicas, en particular de marcos promocionales, se fundamenta en tres pilares no mutuamente excluyentes, cuya importancia puede variar con el tiempo:
 - a. Aspectos medioambientales y de salud humana. Se vinculan a la reducción de GEI y/o al mejoramiento de la calidad del aire, que se ve afectada por la quema de combustibles fósiles.
 - b. La seguridad y la diversificación energética. Este pilar suele centrarse en el reemplazo del petróleo y los combustibles fósiles en países tradicionalmente importadores de crudo o sus derivados.
 - c. El desarrollo agrícola y cuestiones económicas. Los países con importantes excedentes agrícolas suelen orientarlos a la producción y al consumo de biocombustibles, lo genera una demanda más estable de estos y, en forma asociada, supone beneficios económicos derivados de la generación de empleo y valor agregado.

Bibliografía consultada

- Bianchi, P. 1995. Construir mercado (en línea). Revista Asturiana de Economía (4). Consultado 8 mar. 2021. Disponible en <http://www.revistaasturianadeeconomia.org/edic4.php>.
- Bisang, R; Torroba, A. 2020. Sistemas de precios y bioenergías (en línea). Buenos Aires, Argentina, IIEP-BAIRES. (Serie Documentos de Trabajo del IIEP, n.o 56). Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <http://iiep-baires.econ.uba.ar/uploads/publicaciones/525/archivos/1.pdf>.
- Chisari, OO; Ferro, G. 2011. Tópicos de economía de la regulación de los servicios públicos (en línea). Buenos Aires, Argentina, UADE. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en https://www.uade.edu.ar/DocsDownload/Publicaciones/4_226_1817_STD065_2011.pdf.
- Hamilton, A. 1791. Report on manufactures (en línea). In Syrett, HC (ed.). The papers of Alexander Hamilton. Nueva York, Estados Unidos de América, CUP. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://press-pubs.uchicago.edu/founders/documents/v1ch4s31.html>.
- IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, Costa Rica). 2021. El ABC de políticas para el desarrollo y fortalecimiento de la bioeconomía: manual de capacitación. San José.
- Ley de Independencia y Seguridad Energética N.o 110-140 (en línea). Estados Unidos de América. 19 dic. 2007. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://www.govinfo.gov/content/pkg/PLAW-110publ140/pdf/PLAW-110publ140.pdf>.
- Ley de Seguridad Energética n.o 96-294 (en línea). Estados Unidos de América. 30 jun. 1980. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://www.govinfo.gov/content/pkg/STATUTE-94/pdf/STATUTE-94-Pg611.pdf>.
- List, F. 1909. Sistema nacional de economía política. Londres, Reino Unido, Longman.
- Nelson, R. 1994. The co-evolution of technology, industrial structure, and supporting institutions. *Industrial and Corporate Change* 3(1):47-63.
- Oliveira, G; McKay, B; Plank, C. 2017. How biofuel policies backfire: misguided goals, inefficient mechanisms, and political-ecological blind spots. *Energy Policy* 108:765-775.
- Pérez, C. 2010. Technological revolutions and techno-economic paradigms. *Cambridge Journal of Economics* 34(1):185-202.
- Sacoto, J. 2021. Biodiésel: mercados, regulaciones y perspectivas. In *Formación de capacidades en biocombustibles para formuladores de políticas públicas y reguladores* (2021, San José, Costa Rica). IICA.

- Schumpeter, JA. 1934. Capitalismo, socialismo y democracia. Nueva York, Estados Unidos, Harper.
- Stolf, R; Oliveira, APR. 2020. The success of the Brazilian Alcohol Program (PROÁLCOOL): a decade-by-decade brief history of ethanol in Brazil (en línea). Engenharia Agrícola 40(2):243-248. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v40n2p243-248/2020>.
- Torroba, A. 2020a. Atlas de los biocombustibles líquidos 2019-2020 (en línea). San José, Costa Rica, IICA. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/13974/BVE20128304e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Torroba, A. 2020b. Los biocombustibles líquidos en las Américas: situación actual y potencial de desarrollo (en línea). San José, Costa Rica, IICA. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/9975/BVE20058034e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Yacobucci, BD; Womach, J. 2006. Fuel ethanol: background and public policy issues: CRS Report for Congress (en línea). Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en https://www.everycrsreport.com/files/20041217_RL30369_b71236f0999b7fcfb70f3bf595d5f5f4b84f542d.pdf.

Capítulo 4: Situación actual de los biocombustibles: panorama general y estudios de casos

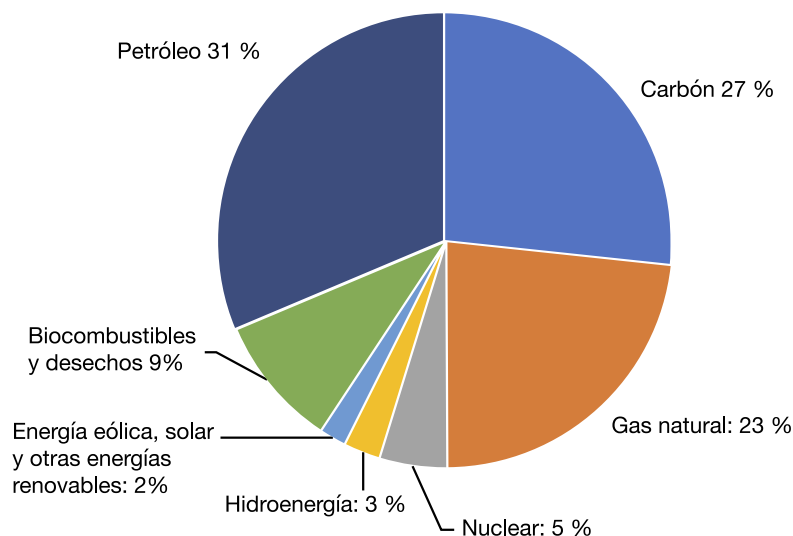
¿Cómo ha evolucionado la producción, el consumo y los principales indicadores de los biocombustibles líquidos? ¿Qué importancia tienen ellos en la matriz energética y de combustibles líquidos? ¿Cuál ha sido el impacto de la COVID-19? ¿Cómo se espera que evolucione el consumo de los biocombustibles? ¿Hay estudios de casos que sirvan como guía para desarrollar aspectos específicos de políticas públicas?

El presente capítulo se dividirá en tres secciones. En la primera se revisa la evolución reciente de los principales indicadores asociados a los biocombustibles líquidos, examinando los efectos de la pandemia y las restricciones de movilidad durante 2020. La segunda sección se centrará en las perspectivas, mientras que en la tercera se hará hincapié en algunos estudios de casos relevantes en la formulación de políticas públicas.

Situación actual y evolución reciente en el mundo ⁵¹

La composición de las matrices energéticas⁵² en América Latina y Caribe (ALC) y el resto del mundo tiene una característica en común: su fuerte dependencia de las fuentes fósiles. El 81 % del consumo energético mundial y casi el 70 % de la matriz de ALC lo constituyen el carbón mineral, el gas natural y el petróleo. El uso de la biomasa se puede dividir en dos: la biomasa tradicional⁵³ y la biomasa o los biocombustibles modernos. Ambos representan el 9 % de la matriz mundial y el 22 % de la oferta energética de América Central y América del Sur. Cabe destacar que se observa una evolución creciente en el uso total de este último tipo de biomasa.

Ilustración 20. Oferta energética mundial en 2018.



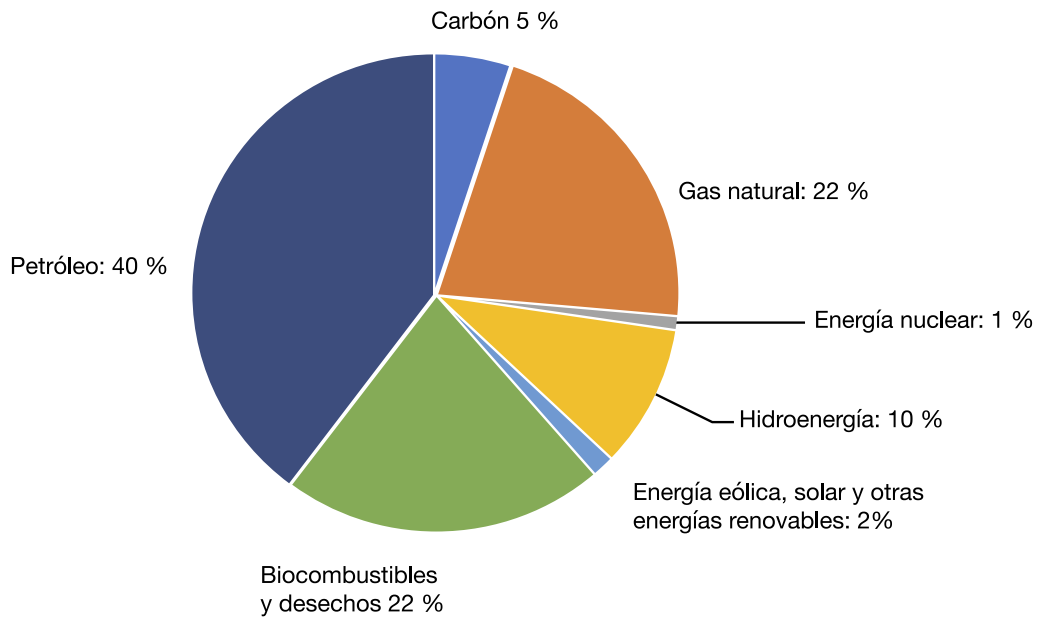
Fuente: Elaborado con base en AIE 2020b.

⁵¹Para obtener más información sobre la situación de los biocombustibles en el mundo, consúltese Torroba 2020.

⁵²Se denomina “matriz energética” a la oferta primaria total de energía.

⁵³Según la AIE (2020a), la biomasa tradicional es el consumo de biomasa del sector residencial de los países en desarrollo, es decir, la utilización, frecuentemente insostenible, de madera, carbón vegetal, residuos agrarios y estiércol para la cocina y la calefacción. Todos los demás usos de la biomasa se definen como modernos.

Ilustración 21. Oferta energética de América del Sur y América Central en 2018.

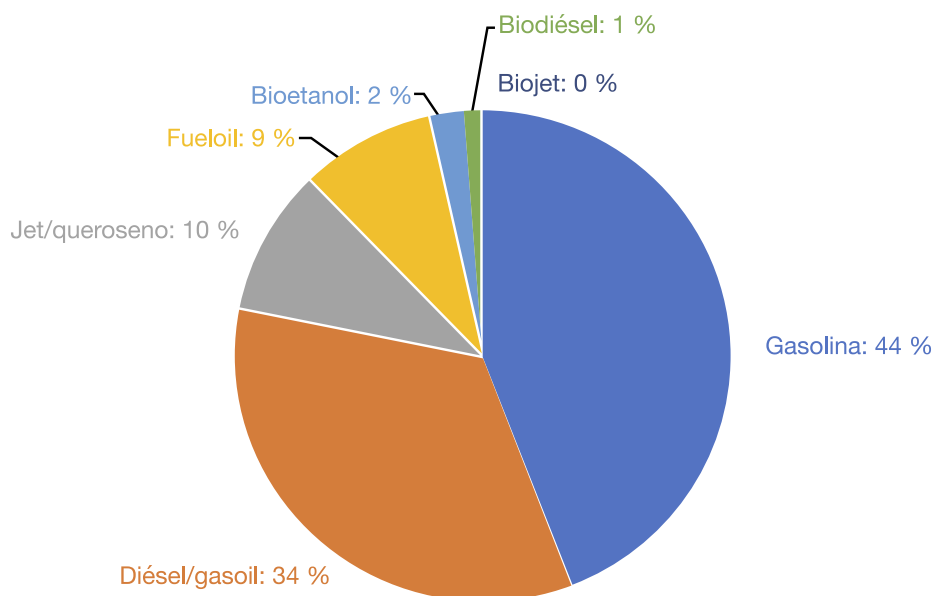


Fuente: Elaborado con base en AIE 2020b.

Luego del petróleo, el gas natural y el carbón, la biomasa constituye la cuarta fuente de bioenergía, que resulta de la fotosíntesis vegetal, como parte de un proceso de captación de energía solar, CO₂, agua y otros componentes.

El desarrollo asociado a la producción y al consumo de biocombustibles líquidos ha ido incrementando su participación en la matriz de combustibles líquidos, debido a lo cual hoy representa una mezcla en volumen del 3.5 % sobre el consumo total de combustibles líquidos de origen fósil.

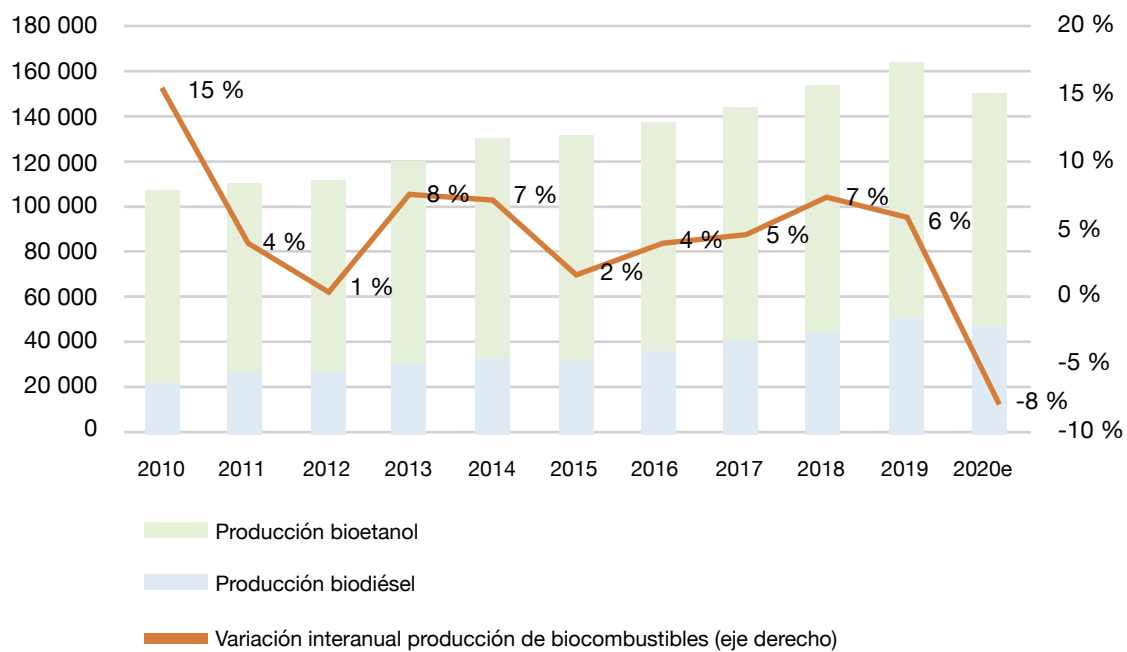
Ilustración 22. Participación de los biocombustibles en la matriz de combustibles líquidos en 2019.



Fuente: Elaborado con base en IICA 2021 y BP 2020.

Por otra parte, la producción mundial de biocombustibles líquidos ha mostrado un crecimiento acumulado del 53 % en la última década (2010-2019). En ese período la tasa de variación interanual osciló entre 1 % y 13 %, con una clara tendencia alcista en la producción, que en 2019 llegó a 163 000 000 m³. Los efectos de la pandemia y las restricciones a la movilidad se hicieron sentir en la producción de biocombustibles, que se estima que disminuyó cerca de 8 %. La producción de bioetanol se vio más fuertemente afectada, con una caída estimada del 10 %, mientras que la producción de biodiésel disminuyó en torno al 2.5 %.

Ilustración 23. Variación interanual porcentual, tendencia y producción total (en miles de m³) de biocombustibles líquidos en el mundo.



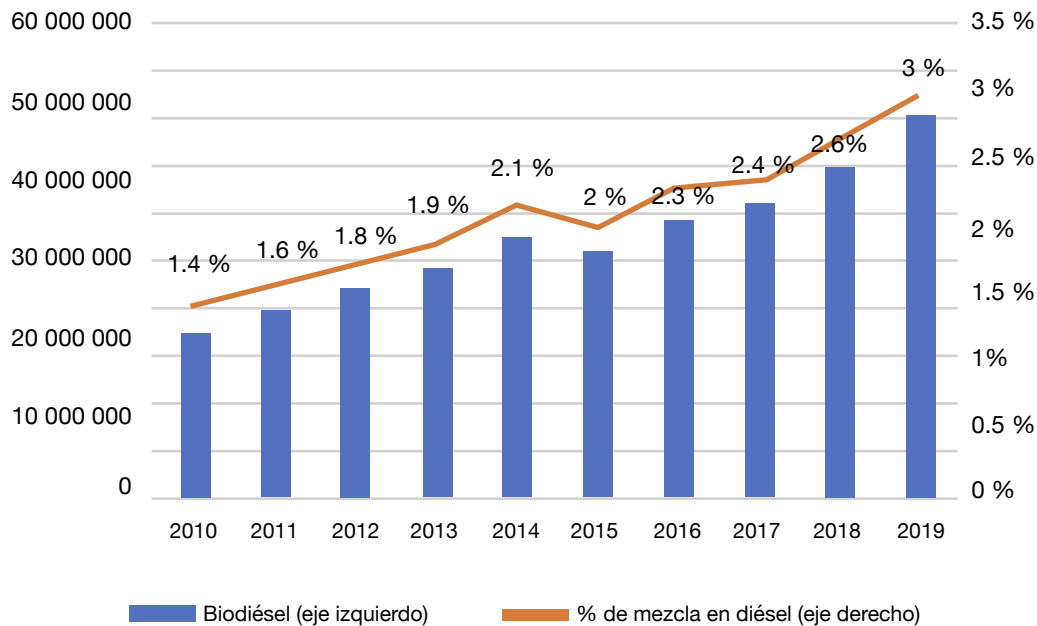
Nota: 2020 estimado.

Fuente: Elaborado con base en IICA 2021 y AIE 2021b.

Por otra parte, en la última década (2010-2019) el consumo mundial de biodiésel mostró un crecimiento acumulado del 129 %. Asimismo, con una clara tendencia creciente, en 2019 el biodiésel representó una mezcla de 3 % en el diésel total consumido en todo el mundo⁵⁴. Ello implica que en los últimos diez años su participación se ha más que duplicado.

⁵⁴ Mezclas expresadas como porcentaje volumen en volumen.

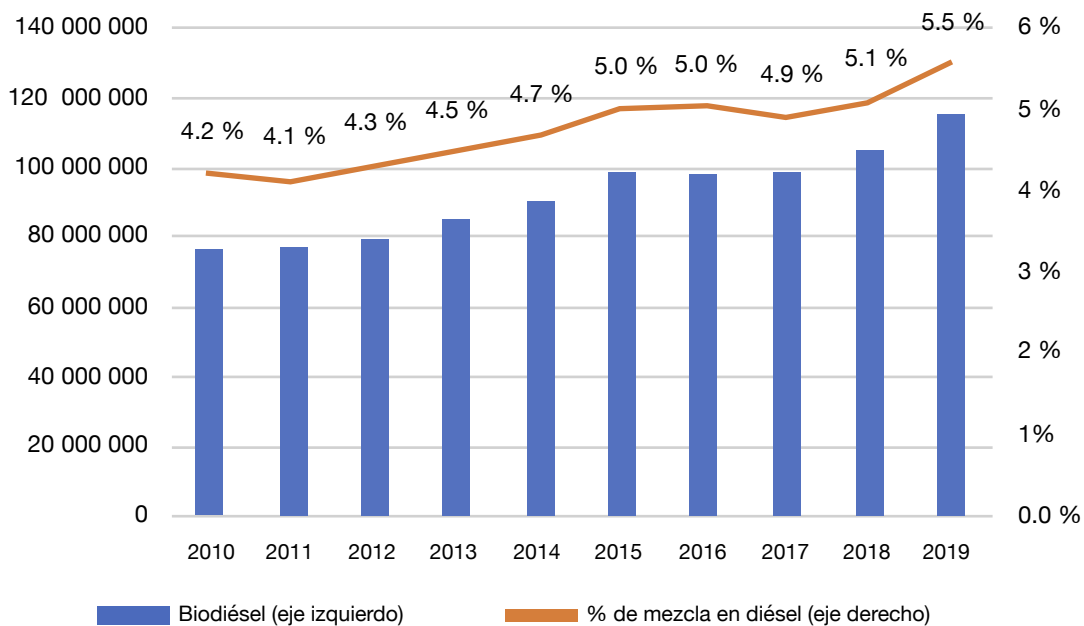
Ilustración 24. Evolución del consumo total (en miles de m3) de biodiésel y su mezcla en diésel en el mundo.



Fuente: Elaborado con base en IICA 2021 y BP 2020.

Asimismo, en la última década (2010-2019) el consumo mundial de bioetanol tuvo un crecimiento acumulado del 50 %. Asimismo, en 2019 la mezcla de bioetanol en gasolina representó un pico histórico, al ubicarse en el 5.5 %.

Ilustración 25. Evolución del consumo total (en miles de m3) de bioetanol y su mezcla en gasolina en el mundo.



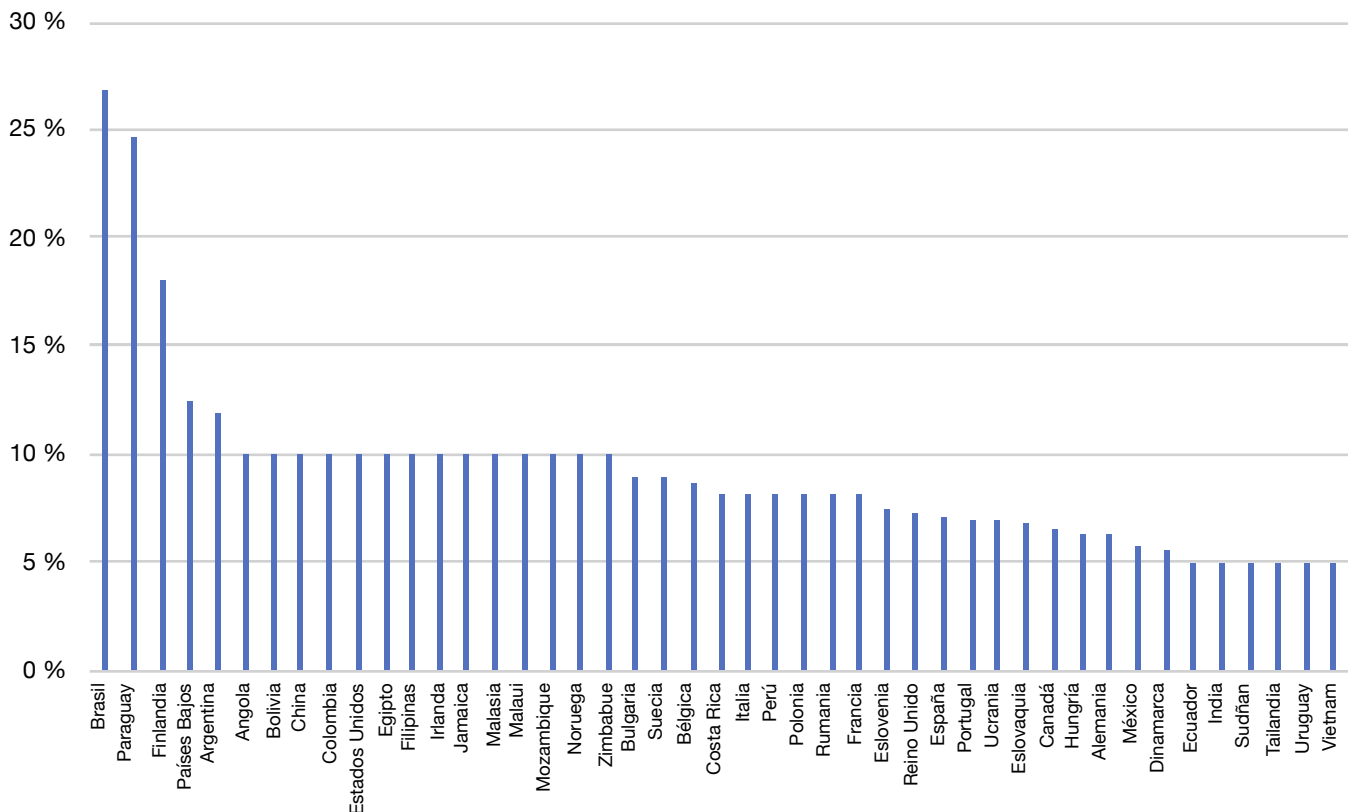
Fuente: Elaborado con base en IICA 2021 y BP 2020.

La evolución en la producción y el consumo de los biocombustibles puede explicarse en gran medida por los “mandatos” establecidos en los marcos normativos, que pueden tener diferentes formas y entre los cuales se destacan los siguientes:

- a) Los “mandatos de mezcla obligatoria”. Son las obligaciones de mezclar, en los ámbitos nacional y subnacional (estados, departamentos, provincias, etc.), bioetanol con gasolina y biodiésel con diésel fósil. Dichas mezclas suelen expresarse en unidades volumétricas (mezclas volumen/volumen) o como unidades energéticas (mezclas de energía/energía).
- b) Los “mandatos generales” de mezcla de biocombustibles con combustibles fósiles. Dichas obligaciones se cumplen en forma agregada, independientemente del tipo de biocombustible utilizado.
- c) Un mecanismo adicional consiste en fijar metas de reducción de GEI y, en forma asociada, promover el uso de biocombustibles para cumplirlas.

En 2019 se registraron al menos 53 mandatos de uso de bioetanol. A pesar de que no siempre se cumplen, suelen representar gran parte del consumo de este en los diferentes países. Independientemente de los mandatos, existen mercados libres de amplio desarrollo como la comercialización de bioetanol hidratado combustible en Brasil o las ventas de E85 en Estados Unidos y varios países de Europa. En el siguiente cuadro se puede ver una selección de países con usos mandatorios de bioetanol.

Ilustración 26. Mandatos directos e indirectos seleccionados de uso del bioetanol en la gasolina.

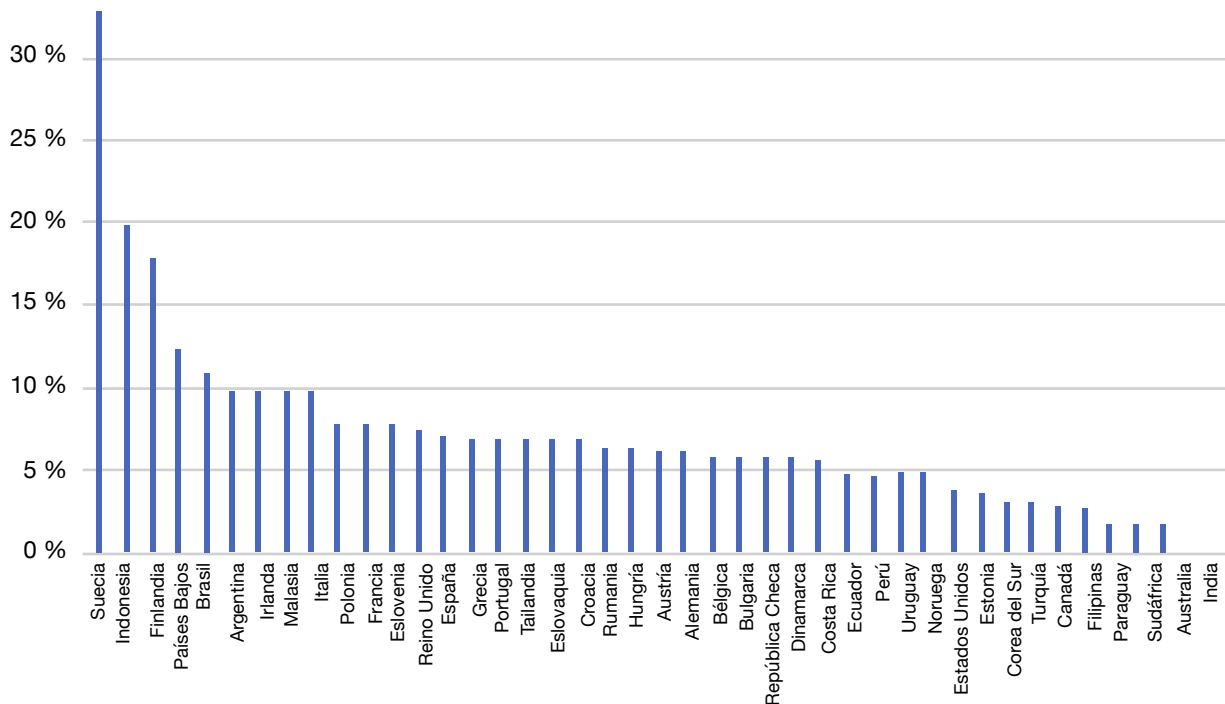


Nota: Mandatos obligatorios, mandatos generales y uso promedio de biocombustibles en países con metas de reducción de GEI. En aquellos países con mandatos subnacionales se toma como referencia la mezcla (volumen/volumen) con gasolina efectiva en el plano nacional.

Fuente: Elaborado con base en IICA 2021.

En 2019 se contabilizaron 43 países con obligación de uso de biodiésel bajo los tres mecanismos descritos anteriormente. En 2021 pueden advertirse algunos cambios destacables en materia de mandatos respecto del gráfico siguiente: en primer lugar, Indonesia tiene actualmente un mandato B30, pero tiene como objetivo expandirlo para lograr ahorros de divisas a partir de menores importaciones de combustible y apoyar al sector local de aceite de palma. La siguiente parada de la ambiciosa política de biodiésel de este país sería un mandato B40 en el transporte por carretera. En segundo lugar, Brasil continúa con su programa de ampliación de mandato (con algunas pequeñas interrupciones temporales), encaminándose a utilizar B13 en 2021, B14 en 2022 y B15 en 2023. Además, Colombia avanzó en la aplicación de B12 a partir de abril de 2021 en casi todo el país. Malasia, por su parte, cuenta con un mandato B10 y tenía previsto incrementarlo en el primer trimestre de 2020 a una mezcla del 20 % de biodiésel, pero, a consecuencia de la pandemia, dicho plan se ha visto retrasado. El Gobierno modificó la fecha de este mandato para mediados de 2021; no obstante, según varios analistas, no se logrará dicho objetivo hasta 2022. Finalmente, se esperan mayores cuotas de biocombustibles (biodiésel y bioetanol) en varios países de la UE.

Ilustración 27. Mandatos directos e indirectos de uso de biodiésel en el diésel fósil en 2019.



Nota: Mandatos obligatorios, mandatos generales y uso promedio de biocombustibles en países con metas de reducción de GEI. En los países con mandatos subnacionales se toma como referencia la mezcla (volumen/volumen) con diésel efectiva en el plano nacional.

Fuente: Elaborado con base en IICA 2021.

Por su parte, los biocombustibles para aviación tienen consumos marginales, cercanos al 0.1 % del total del combustible para aviones del mundo⁵⁵. El consumo de biocombustibles para la navegación es prácticamente nulo.

⁵⁵Noruega fue el primer país en establecer mandatos de mezcla de biocombustibles para la aviación. En tal sentido, TE 2020 destaca que dicho país tiene un mandato que entró en vigor el 1.º de enero de 2020. Los objetivos son de 0.5 % para 2020 y 30 % para 2030 (como contenido de energía total).

Sin embargo, como se verá en la siguiente sección, se espera que los biocombustibles tengan nuevas aplicaciones fuera del segmento terrestre. Los esfuerzos de descarbonización estarán en el centro de los debates de política energética en todo el mundo. En tal sentido, se destaca que en Europa, los gobiernos de Noruega y Suecia dictaron una legislación en apoyo a los biocombustibles sostenibles para aviación, mientras que Francia está discutiendo un mandato al respecto para su introducción en el corto plazo. También se han realizado debates sobre los mandatos en la aviación en otros Estados miembros de la UE, incluidos Alemania, los Países Bajos y España, mientras que varias iniciativas de la industria están en marcha en los Estados Unidos.

La situación del biocombustible marítimo es diferente. Hasta ahora no se planean mandatos, pero existen los objetivos de descarbonización y desulfuración de la OMI. El año pasado se realizaron varios ensayos con diversas mezclas de biocombustibles, que se prevé que continuarán en 2021.

Perspectivas

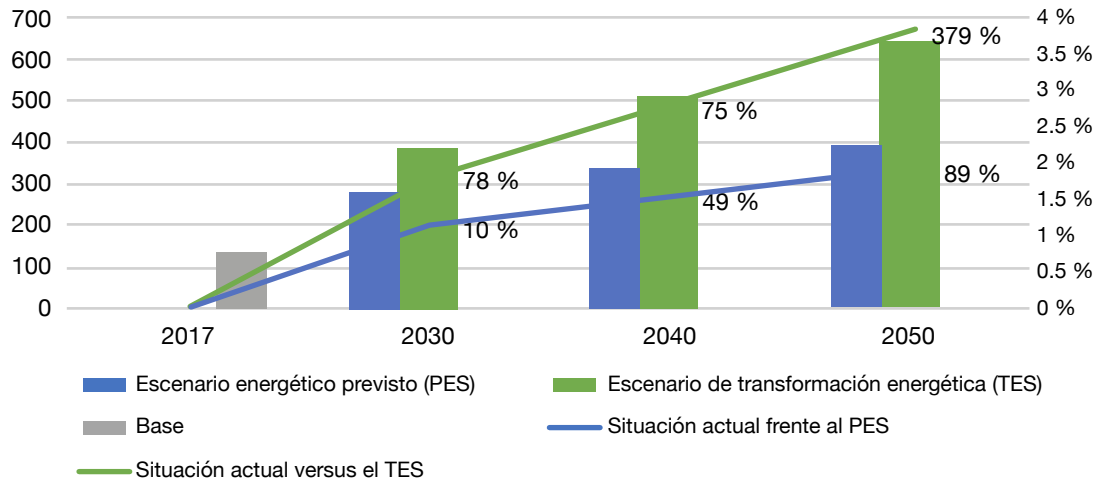
Se espera que durante 2021 la producción mundial de biocombustibles recupere los niveles prepandemia, es decir, de 2019; no obstante, la recuperación será heterogénea, observándose un aumento importante en la producción de biodiésel, fuertemente vinculada a la recuperación y los nuevos mandatos descritos anteriormente y con una fuerte participación del HVO. En tal sentido, se espera que los aceites vegetales hidrotratados representen el 15 % de la oferta total de biodiésel durante 2021.

La recuperación del bioetanol será más lenta con respecto a la del biodiésel, con retrasos en la aplicación de nuevas políticas en algunos países. Sin embargo, la aplicación de medidas en la India puede modificar el ritmo de la recuperación. En tal sentido, en dicho país la Política de Biocombustibles de 2018 fijó un objetivo de mezcla del 20 % en volumen de etanol combustible para 2030. El Gobierno tiene como objetivo lograr el primer hito, con una mezcla del 10 % para 2022. La participación aumentaría en 8.5 % en el presente año, lo que significaría un gran impulso para el bioetanol.

En el mediano y el largo plazos se espera un fuerte incremento en la producción mundial de biocombustibles. De acuerdo con el “Escenario energético previsto” (PES) de la IRENA (2017)⁵⁶, la producción de biocombustibles se incrementaría 110 % en 2030 (en comparación con 2017), llegando a 189 % en 2050. En un escenario de descarbonización más agresivo (“Escenario de transformación energética”, TES), la producción se incrementaría 379 % en 2050 y 15 % de ella correspondería a biocombustibles de aviación.

⁵⁶ Este escenario es el caso de referencia principal del citado estudio, que proporciona una perspectiva del desarrollo del sistema energético, con base en planes energéticos actuales de los gobiernos y otros objetivos y políticas planificados (a partir de 2019), incluidas las contribuciones determinadas a nivel nacional en virtud del Acuerdo de París, a menos que el país tenga objetivos o planes climáticos y energéticos más recientes.

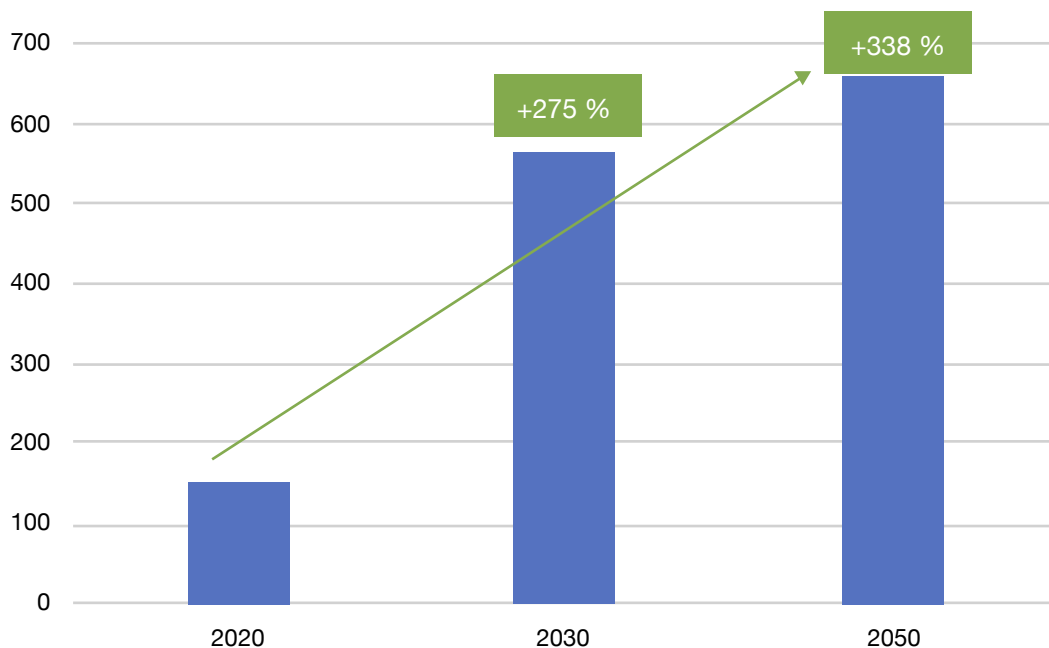
Ilustración 28. Evolución de la producción de biocombustibles líquidos (millones de m³) bajo diferentes escenarios energéticos de IRENA



Fuente: Elaborado con base en IRENA 2017.

En el reciente informe publicado por la AIE (2021a), intitulado *Net zero by 2050: a roadmap for the global energy sector*, se describe cómo el sector energético global puede llegar a un escenario de cero emisiones netas en 2050. Se prevé un fuerte incremento en el consumo de los biocombustibles en la presente década, con un aumento del 275 % fuertemente concentrado en la movilidad terrestre por carretera. A partir de 2030 el consumo seguiría creciendo, pero de forma más lenta, y su uso se trasladaría al transporte marítimo y la aviación a medida que la electrificación se expanda en el transporte por carretera. En 2050 casi la mitad del uso de los biocombustibles líquidos se dedicaría a la aviación.

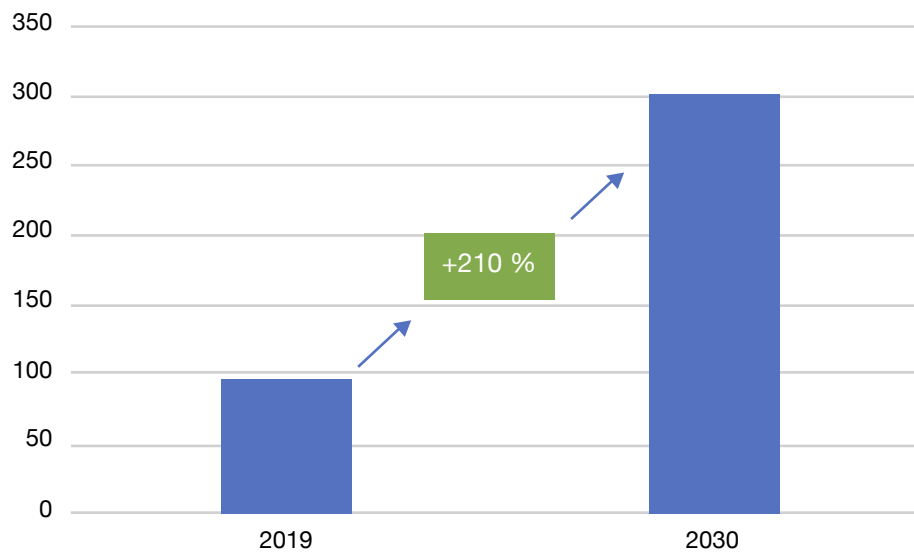
Ilustración 29. Posible evolución del consumo de biocombustibles líquidos (en millones de m³), de acuerdo con el escenario de cero emisiones netas en 2050 de la AIE.



Fuente: Elaborado con base en AIE 2021a.

De conformidad con un escenario menos exigente en materia de emisiones, pero que se mantiene ajustado a las exigencias ambientales del Acuerdo de París, esto es, bajo el escenario de desarrollo sostenible de la AIE, se espera que la producción de biocombustibles líquidos se incremente 210 % en 2030, en comparación con el consumo de 2019, llegando a los 298 millones de toneladas equivalentes de petróleo (tep).

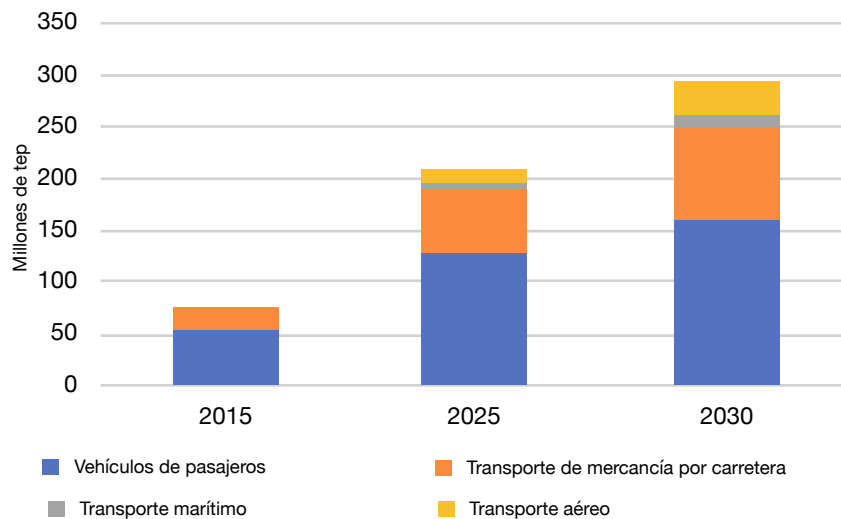
Ilustración 30. Evolución de la producción mundial de biocombustibles 2019-2030 en comparación con el consumo en el escenario de desarrollo sostenible (en millones de tep).



Fuente: Elaborado con base en AIE 2020a.

Este incremento tendrá una fuerte participación de los biocombustibles (bioetanol y biodiésel) en el transporte terrestre. En tal sentido, el 56 % de los 298 millones de tep se consumirían en forma de biocombustibles destinados al transporte de pasajeros y 28 %, al transporte de mercancía por carretera. Además, se espera el ingreso de otros biocombustibles, con el 10 % de su consumo en el sector de la aviación y el 5 %, en el transporte marítimo.

Ilustración 31. Desglose del consumo de biocombustibles en el escenario de desarrollo sostenible (en millones de toneladas equivalentes de petróleo) durante el período 2015-2030.



Fuente: Elaborado con base en AIE 2020a.

En torno a la producción de HVO, el crecimiento de dicha industria mostraría un crecimiento destacable en los próximos cinco años. La capacidad productiva se podría incrementar hasta 33 000 000 m³ anuales en 2025, lo que supondría un aumento de 250 % en relación con 2020. No solo se incrementaría la capacidad productiva, sino también la producción, que pasaría de alrededor de 5 500 000 m³ en 2018 a 13 000 000 m³ en 2024. Adicionalmente, el segmento de producción de este biocombustible presenta una creciente integración en el sector y en empresas petroleras. En tal sentido, se estima que el 27 % del HVO producido en 2020 provino de refinerías de petróleo que fueron reconvertidas para la producción de biocombustibles.

Ideas destacadas

1. El desarrollo asociado a la producción y al consumo de biocombustibles líquidos ha ido incrementando su participación en la matriz de combustibles líquidos en todo el mundo, lo que representa una mezcla en volumen del 3.5 % sobre el consumo total de combustibles líquidos de origen fósil en 2019.
2. En la última década (2010-2019) la producción mundial de biocombustibles líquidos ha mostrado un crecimiento acumulado del 53 %. Durante 2020 los efectos de la pandemia provocaron una disminución de casi 8 % (con una caída de 10 % del bioetanol y de 2.5 % del biodiésel).
3. La evolución en la producción y el consumo de los biocombustibles se puede explicar en gran medida por los “mandatos” establecidos en los marcos normativos.
 - a. En 2019 se registraron al menos 53 mandatos de uso de bioetanol.
 - b. En 2019 se contabilizaron 43 países con obligación de uso de biodiésel. En 2021 se pueden advertir algunos cambios destacables en materia de mandatos, con algunos incrementos destacables.
4. En el corto plazo, se espera una recuperación heterogénea de la producción de biocombustibles, con valores similares a los de 2019.
5. En el mediano y el largo plazos se espera un fuerte incremento en la producción mundial de biocombustibles, con una fuerte participación del bioetanol y el biodiésel y con la entrada comercial de los biocombustibles destinados a la aviación y la navegación.

Estudios de casos

A continuación, se detalla la evolución de los biocombustibles en seis países destacados en torno a los siguientes cuatro temas: a) marco general y normativo, b) mandatos, c) aspectos impositivos y tributarios, y d) otros biocombustibles (avanzados, para aviación, etc.).

1. *Indonesia*

a. *Marco general y normativo*

De acuerdo con la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) (2020), Indonesia es la economía más grande del sudeste asiático y un importante productor y exportador de combustibles fósiles. Constituye el mayor exportador neto de carbón y el octavo exportador de GNL. Según el Equipo de Revisión por Pares del G20 2019 Japón (2019), Indonesia exporta el 60 % de la energía que produce e importa un tercio de la energía que consume. La gasolina, el diésel y el gas licuado de petróleo (GLP) son los principales productos importados.

Por otro lado, presenta un gran potencial para la producción de energía renovable. En lo que se refiere a biocombustibles, es el mayor productor de biodiésel de Asia, con una producción de unos 56 000 barriles/día, principalmente a partir de aceite de palma. El 95 % se consume en el ámbito nacional, principalmente en el sector de transporte, mientras que solo una pequeña fracción es utilizada en la generación de electricidad.

De acuerdo con Rahmanulloh (2019), Indonesia comenzó a implementar su Política Nacional de Biocombustibles en 2006, mediante el Reglamento 1, que rige la adquisición y el uso de los biocombustibles. En apoyo a dicho reglamento, ese mismo año se aprobó el Decreto Presidencial 20/2006, que establece la formación del Equipo Nacional de Desarrollo de Biocombustibles para supervisar la implementación del Programa de Biocombustibles y elaborar un plan para su desarrollo.

En 2008 se estableció un mandato obligatorio por medio de una regulación del Ministerio de Energía y Recursos Minerales (MEMR) (Regulation 32), que se revisó en 2015. Posteriormente se aprobó una nueva regulación (Regulation 12/2015), a través de la cual en 2016 se implementó un mandato B20 para el sector del transporte PSO⁵⁷. En septiembre de 2018 este mandato se amplió al transporte no PSO⁵⁸. En enero de 2020 se empezó a implementar un mandato B30.

Si bien se establecieron objetivos obligatorios como en el caso del biodiésel, al bioetanol no se le da ningún uso como combustible, debido a factores como lo costoso de la materia prima, una capacidad de producción limitada y las restricciones a las importaciones.

⁵⁷PSO: combustible subvencionado para vehículos de carretera que se vende únicamente mediante la empresa estatal Pertamina.

⁵⁸No PSO: combustible no subvencionado que se vende por medio del sector privado.

Tabla 5. Objetivos obligatorios en materia de biodiésel y bioetanol.

Biodiésel			
Sector	2016	2020	2025
Transporte PSO	20 %	30 %	30 %
Transporte no PSO	20 %	30 %	30 %
Industria	20 %	30 %	30 %
Electricidad	30 %	30 %	30 %

Bioetanol			
Sector	2016	2020	2025
Transporte PSO	2 %	5 %	20 %
Transporte no PSO	5 %	10 %	20 %
Industria	5 %	10 %	20 %

Fuente: Tomado de USDA (2019).

El Programa de Biocombustibles es considerado un componente clave de la Política Nacional de Energía del país, el cual tiene como objetivo alcanzar 23 % de uso de energía renovable en 2025 y 31 % en 2050. La contribución de los biocombustibles al cumplimiento de estos objetivos se traduce aproximadamente en 13.9 billones de litros y 52.3 billones de litros, respectivamente.

El impulso de la Política Nacional de Biocombustibles tiene como objetivos mejorar la balanza de pagos, lograr una autosuficiencia energética y apoyar al sector del aceite de palma.

b. Mandatos

El mandato actual sobre el biodiésel establece una mezcla de 70 % de diésel y 30 % de biodiésel. Según Sapp (2021), el objetivo era ampliar dicho mandato a un B40; sin embargo, este se ha visto afectado por la pandemia, lo que podría retrasar la ampliación hasta finales de 2022 o después.

En el caso del bioetanol, a pesar del establecimiento de los mandatos de mezcla E5 y E10 para 2020 (PSO y no PSO, respectivamente) y E20, para 2025, los primeros aún no se han implementado. Actualmente no se produce ni se consume etanol de grado combustible.

c. Aspectos impositivos y tributarios

De conformidad con Rahmanulloh (2019), entre los impuestos aplicados a los biocombustibles se incluye un gravamen a la exportación de biodiésel y su principal materia prima, el aceite de palma crudo (APC).

En 2018 dicho gravamen, que era una estructura de tipo fijo, pasó a ser una basada en precios, dada la disminución de los precios del aceite de palma. A principios de 2019 la recaudación de impuestos se detuvo por completo, por lo que durante ese año el fondo de aceite de palma no recaudó nuevos ingresos. En enero de 2020 se reanudó la recaudación, dada el alza en los precios del APC (superior a USD 600/t).

Según Rahmanulloh (2020), la fuerte caída en el precio del petróleo y la reducción de la movilidad provocaron grandes diferencias entre los precios del diésel y el biodiésel, lo que generó un aumento en los subsidios. Frente a esta situación, el Ministerio de Finanzas implementó el Reglamento 57/2020, a través del cual se adicionan USD 5/t con respecto al gravamen anterior a las exportaciones de productos de aceite de palma, incluido el biodiésel de palma.

Por otro lado, para la importación de biocombustibles se requiere una recomendación del MEMR. El Ministerio de Finanzas, mediante el Reglamento 6/2017, establece los aranceles al etanol sin desnaturalizar y desnaturalizado (30 %), al biodiésel con un contenido superior a 70 % de éster metílico de coco y al biodiésel con un contenido superior a 96.5 % de éster alquílico (5 %). En el caso de los aceites de petróleo que contienen hasta 30 % de biodiésel, no se aplica ningún impuesto.

La OCDE (2020) señala que el Gobierno aplica medidas de respaldo a los combustibles fósiles, principalmente como compensación a la Empresa Estatal de Minería de Petróleo y Gas Natural (PERTAMINA) por los bajos precios minoristas que la empresa cobra por la venta de gasolina premium de 88 RON y diésel, así como por ciertas ventas de GLP y queroseno. Por otro lado, se establecen obligaciones en el mercado interno, según las cuales los productores de carbón, petróleo y gas natural deben vender en el mercado interno una parte de su producción (generalmente entre el 15 % y el 25 %) a precios reducidos.

Como medida para apoyar el consumo interno de biodiésel, en 2015 se creó un mecanismo administrado por la Agencia de Gestión del Fondo de Plantaciones de Palma Aceitera, para brindar un subsidio a los productores, a fin de compensar la diferencia entre los precios del biodiésel⁵⁹ y del diésel fósil⁶⁰. Dicho fondo se utiliza también en actividades de investigación y desarrollo, replantación y promoción de la palma.

d. Otros biocombustibles

En cuanto a los biocombustibles avanzados, se destaca que en enero de 2019 PERTAMINA y la Corporación Nacional de Hidrocarburos (ENI) de Italia firmaron un acuerdo para desarrollar una refinería de combustibles renovables para la producción de HVO. En la actualidad no se realiza una producción a nivel comercial.

2. *Malasia*

a. Marco general y normativo

La Administración de Información Energética (EIA 2021) indica que el Gobierno de este país pretende priorizar la generación de energía limpia y aumentar su capacidad de producción, con el objetivo de alcanzar en 2025 un 25 % de energías renovables, a fin de reducir sus emisiones de GEI.

De acuerdo con Verzani (2020), la formulación de políticas públicas relacionadas con el uso de biocombustibles comenzó en 2006, cuando se publicó la Política Nacional de Biocombustibles, con los objetivos principales de utilizar fuentes de energía sostenibles, reducir la dependencia de los combustibles fósiles y ayudar a estabilizar la industria del aceite de palma.

⁵⁹Utilizando el precio índice del mercado del biodiésel, publicado por la Dirección de Energías Nuevas y Renovables.

⁶⁰Teniendo en cuenta el precio índice del mercado del diésel, publicado por la Dirección General de Petróleo y Gas.

En 2007 el Parlamento de Malasia aprobó la Ley de la Industria de Biocombustibles, que incluye disposiciones de la Política Nacional de Biocombustibles para comenzar a implementar un mandato de mezcla para el biodiésel. Si bien a inicios de 2008 se estableció un mandato de 5 %, no fue sino hasta 2014 cuando se logró abarcar la totalidad del país.

Posteriormente, debido al aumento en las existencias de aceite de palma y a la disminución en su precio, el Gobierno decidió aumentar el mandato para el sector del transporte, con una mezcla de 7 % de biodiésel por ser implementada en 2015; sin embargo, este objetivo se cumplió por completo hasta 2016.

A finales de 2015 se lanzó una estrategia de cinco años, denominada “Undécimo Plan de Malasia (2016-2020)”, para promover el consumo interno de biodiésel en el transporte e ir aumentando la mezcla efectiva con el objetivo de conseguir en 2020 una tasa de 20 % de biodiésel. Esto generó objeciones por parte de la industria del transporte, debido al costo asociado a modernizar los vehículos para adaptarse a mezclas más altas, lo que llevó al atraso en el desarrollo de dicho plan. Por lo tanto, el aumento a un mandato B10, planificado para 2016, se logró hasta febrero de 2019. En el sector de la industria el mandato implementado en ese año fue de 7 %.

b. Mandatos

El mandato actual del país en relación con el biodiésel es una proporción de 90 % de diésel y 10 % de biodiésel. Se tenía planificado ampliarlo para lograr durante el primer trimestre de 2020 una mezcla de 20 % de biodiésel; no obstante, a consecuencia de la pandemia, dicho plan se ha retrasado. El Gobierno modificó la fecha para mediados de 2021, pero, según varios analistas, dicho objetivo no se logrará sino hasta 2022.

Malasia carece de un programa de bioetanol combustible, ya que no cuenta con suficiente materia prima para abastecerlo y no ha incluido entre sus planes sustentar dicho programa por medio de la importación de materias primas o de bioetanol.

c. Aspectos impositivos y tributarios

Para garantizar la viabilidad financiera del Programa de Biocombustibles, el Gobierno utiliza un mecanismo automático de fijación de precios del biodiésel. Hasta diciembre de 2014 todos los combustibles distribuidos en las estaciones de servicio eran subvencionados. Posteriormente, a partir de enero de 2015, los precios de los combustibles comenzaron a fijarse utilizando como referencia el precio promedio móvil de la semana anterior del petróleo crudo de Mean of Platts Singapore, con ajuste semanal, incorporando límites de precios.

En el caso del precio de biodiésel B10, el límite es de MYR 2.18/l⁶¹, por lo que, si se supera este valor máximo, el subsidio se activa. El Gobierno también ha otorgado fondos para la construcción de instalaciones y de la infraestructura necesaria para cumplir con el mandato. Además, ha asignado recursos para subsidiar el mandato de mezcla actual, provenientes de los impuestos aplicados a la exportación de aceite de palma y de los ingresos obtenidos de las ventas de diésel.

⁶¹En el informe de Verzani (2020) se utiliza el tipo de cambio al 15 de octubre de 2020 de MYR 4.15 = USD 1. MYR es el símbolo del ringit, la moneda oficial de Malasia.

d. Otros biocombustibles

En lo referente a la producción de biocombustibles avanzados, desde 2002 se vienen realizando investigaciones para la generación de biocombustibles a partir de la biomasa del cultivo de palma, pero en la actualidad no se desarrollan a escala comercial.

3. Tailandia

a. Marco general y normativo

De acuerdo con la IRENA (2017), una de las principales prioridades del país es la seguridad energética, debido a que importa más de la mitad de la energía suministrada y esta proporción puede aumentar por el agotamiento de las reservas de petróleo y gas. Por lo tanto, es imprescindible recurrir a otras fuentes de energía producidas en el país. Por otro lado, Tailandia se ha comprometido a reducir sus emisiones de GEI hasta 2030, para lo cual requiere aplicar medidas de descarbonización en el sector energético.

En lo que refiere al sector del transporte, se espera que la proporción de energías renovables aumente, previéndose que en 2036 el bioetanol y el biodiésel representen dos tercios del total de energías renovables utilizadas en dicho sector.

Según Prasertsri y Chanikornpradit (2020), en el marco del Acuerdo de París, Tailandia se comprometió a reducir sus emisiones de CO₂ de 110 a 140 millones de toneladas en 2030 (del 20 al 25 % de las emisiones de 2015). Para lograr dicha meta se establecieron como medidas aumentar el uso de energías renovables en los hogares y la industria, promover la producción y la utilización de biocombustibles y aumentar la eficiencia energética.

Como antecedentes de los mandatos aplicados en el país, en 2007 se fijó para el biodiésel un mandato obligatorio B2, aplicable al sector del transporte, que no incluyó los sectores industrial ni agrícola.

Posteriormente, en 2015 se elaboró el Plan de Desarrollo de Energías Alternativas (AEDP), en el que se fijó como objetivo general para 2036 lograr que el 30 % del total de la energía consumida fuese renovable. En este sentido, se debía aumentar el consumo de biocombustibles, pasando de 7 % del uso total de energía combustible en 2015, a 25 % en 2036. Para ello, el Gobierno tailandés estableció un objetivo de consumo de etanol de 4.1 billones de litros para 2036, frente a los 1.18 billones de litros de 2015, mientras que, en el caso del biodiésel, se fijó un objetivo de consumo de 5.1 billones de litros para 2036, frente a los 1.24 billones de litros del consumo del 2015.

El 30 de abril de 2019 se aprobó el actual AEDP para el período 2018-2037. Los objetivos de consumo de bioetanol y biodiésel fueron revisados a la baja, fijándose en 2.7 y 2.9 billones de litros, respectivamente, para 2037. Estos cambios en los objetivos se deben fundamentalmente a la falta de materias primas para mantener los programas y a las restricciones en las importaciones.

b. Mandatos

Con respecto a los mandatos, el bioetanol no requiere una mezcla obligatoria, pero sí se establece un objetivo de consumo de 2.7 billones de litros para 2037. En la actualidad se utilizan tres tasas de mezcla de bioetanol: E10, E20 y E85. El Gobierno apunta a suprimir gradualmente la producción de E10 de 91 octanos entre 2018 y 2022, para luego eliminar la de E10 y E85 de 95 octanos entre 2023 y 2027, con la intención de convertir al E20 en la principal mezcla (todos los autos fabricados en Tailandia desde 2008 son compatibles con E20). Sin embargo, la incertidumbre generada por la disponibilidad de materia prima retrasó la ejecución del plan original, por lo que se espera suprimir la venta de E10 de 91 octanos durante el segundo semestre de 2021.

En el caso del biodiésel, se establece el mandato obligatorio de una mezcla B10, principalmente en el transporte en carretera (se excluye el diésel utilizado en la industria y la agricultura), así como de mezclas voluntarias B7 y B20. El objetivo del Gobierno es que la B10 se convierta en la mezcla principal. Por otro lado, fija para 2037 un objetivo de consumo de biodiésel de 2.9 billones de litros.

c. Aspectos impositivos y tributarios

A continuación, se detallan los impuestos específicos que tributan las gasolinas y sus diferentes mezclas con bioetanol. Como se puede apreciar, los impuestos suelen ser de menor cuantía a medida que aumentan las mezclas con bioetanol.

Tabla 6. Impuestos a las gasolinas y a sus mezclas con bioetanol en Tailandia.

	Gasolina premium (95 octanos)	E10 95 octanos	E10 91 octanos	E20	E85
Impuesto al consumo	6.5	5.85	5.85	5.2	0.975
Impuesto municipal	0.65	0.585	0.585	0.520	0.0975
Fondo petrolero estatal	6.58	0.62	0.62	-2.28	-7.13
Fondo de conservación	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Impuesto al valor agregado	1.6377	1.2569	1.2295	1.0998	0.9726

Nota: Valores al 12 de junio de 2020.

Fuente: Elaborado con base en USDA (2020a).

En el siguiente cuadro se detallan los impuestos específicos que tributan el diésel y sus diferentes mezclas con biodiésel. En forma similar a lo que sucede con las gasolinas, los impuestos suelen ser de menor cuantía a medida que aumentan las mezclas con biodiésel.

Tabla 7. Impuestos al diésel y a sus mezclas con biodiésel en Tailandia.

	B7	B10	B20
Impuesto al consumo	5.99	5.8	5.153
Impuesto municipal	0.599	0.58	0.5153
Fondo petrolero estatal	1.0	-2.5	-4.16
Fondo de conservación	0.1	0.1	0.1
Impuesto al valor agregado	1.2816	1.0473	0.9963

Nota: Valores al 12 de junio de 2020.

Fuente: Elaborado con base en USDA (2020a).

El etanol combustible es un producto de importación/exportación controlada, con un arancel de THB 2.5/l⁶² sobre las importaciones de etanol.

⁶²Aproximadamente USD 0.30/gal, con base en la referencia de THB 31.5/USD 1 al 28 de agosto de 2020.

Entre las medidas en apoyo a los biocombustibles, el Gobierno aplica subsidios a la gasolina mezclada con bioetanol (llamada gasohol en dicho país), lo que reduce su precio entre 25 y 40 % en relación con la gasolina premium. A la mezcla E20 se aplica un subsidio de THB 2.28/l (USD 0.27/gal) y, en el caso de la E85, es de THB 7.13/l (USD 0.86/gal). Sin embargo, en el marco de la nueva Ley del Fondo Estatal del Petróleo, el Gobierno planea eliminar dichos beneficios en 2022, para lo cual implementará un esquema de reducción progresivo. En el caso de la E85, se reducirán a la mitad en 2020 y a 25 % en el período 2021-2022. Con respecto a la mezcla E20, los subsidios disminuirán 25 % en 2020 y 25 % en 2021.

Otra de las medidas adoptadas es el respaldo a la fabricación de vehículos compatibles con gasohol E20 y E85. Se establecen tasas impositivas especiales para autos ecológicos (motores de menos de 1300 cc con una tasa de consumo de combustible de no más de 5 l/100 km) de 17 %, en comparación con el 30 % para los vehículos compatibles con el E10. Además, se efectúa una reducción adicional de 3 % en la tasa de impuestos especiales para la fabricación de autos ecológicos que puedan usar E85.

En torno a los beneficios para estimular el uso del biodiésel, en 2018 el Gobierno comenzó a subsidiar los precios minoristas de la mezcla B20, lo que los redujo THB 3/l (USD 0.36/gal) con respecto a los precios de la B7. Desde el 1.º de diciembre de 2018 hasta el 28 de febrero de 2019 esta brecha se incrementó en THB 5/l (USD 0.60/gal).

Posteriormente, se introdujo la mezcla B10 y, a fin de convertirla en la mezcla predominante, desde el 28 de febrero de 2020, a través de un subsidio, su precio se redujo THB 3/l (36 U.S cent/galón) con respecto a la B7. Por otro lado, también se redujeron los incentivos de subvención de precios para la B20, de THB 5/l (USD 0.60/gal) a THB 3/l (USD 0.36/gal), inferiores a los de la B7 desde agosto de 2019.

La importación de biodiésel está restringida por el Gobierno para proteger a los productores nacionales de palma. Se exige a los importadores que obtengan permisos de importación del Ministerio de Energía. El arancel de importación para el aceite de petróleo que contiene hasta 30 % de biodiésel por volumen es de THB 0.01/l (28 centavos por 1000 l). No existe un arancel de importación para el biodiésel superior a B30.

d. Otros biocombustibles

En lo referente a la producción de biocombustibles avanzados, no ha habido avances a escala comercial. Se planeaba elaborar etanol celulósico, pero, dada la inviabilidad comercial, dicho plan se ha estancado.

Con respecto a la producción de diésel renovable derivado de la hidrogenación, este se ha dejado de comercializar debido a los altos costos que dicha producción supone.

Cabe destacar que, si bien en la actualidad no hay un desarrollo a escala comercial, este país cuenta con una variedad de materias primas para la producción de biocombustibles avanzados, lo que constituye una oportunidad a futuro. Entre ellas se incluyen residuos agrícolas asociados a cultivos, residuos forestales y cultivos energéticos no alimentarios.

4. Colombia

a. Marco general y normativo

De conformidad con la Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia (FEDE BIOCMBUSTIBLES 2021), en el marco de la adopción del Acuerdo de París, esta nación presentó en 2015 las contribuciones determinadas a nivel nacional (CDN), que constituyen los esfuerzos realizados para reducir las emisiones nacionales y de adaptación a los efectos del cambio climático.

En la actualización de las CDN, en términos de las emisiones absolutas para 2030, Colombia fijó como meta un máximo de 169 440 000 t de CO₂eq, lo que representa una reducción del 51 % de las emisiones.

Entre los objetivos de la Política Nacional de Cambio Climático están fortalecer y diversificar la matriz energética nacional, destacándose la importancia de promover los biocombustibles como fuente de energía renovable; reducir las emisiones de GEI y el material particulado; e impulsar la agroindustria nacional.

Según las CDN, uno de los sectores que más contribuye a las emisiones nacionales es el energético, con un pronóstico a 2030 de 124.8 Mt CO₂eq, donde el sector del transporte aportaría 40.68 Mt CO₂eq, lo que significa una meta de reducción de 20.7 Mt CO₂eq.

En lo concerniente a mandatos aplicados, USDA (2020b) señala que Colombia aplica un sistema de mandatos, pero su implementación no se ha realizado de manera uniforme en todo el país y el Gobierno ha eliminado el mandato de mezcla durante ciertos períodos debido a la escasa producción nacional.

Mediante la resolución 40185 del 27 de febrero de 2018 se fijó una obligación de mezcla de 10 % de etanol y 90 % gasolina a partir de marzo de dicho año.

En el caso del biodiésel, la resolución 40666 de agosto de 2019 fijó un mandato de mezcla B12 a partir de septiembre de dicho año, el cual se aplicó en todo el país, excepto en tres departamentos limítrofes con Venezuela, donde no existe un mandato para el bioetanol y se aplica uno de B2 al biodiésel.

En el caso del bioetanol, en la mayor parte del país se ha mantenido el mandato de mezcla entre E8 y E10. En cuanto al biodiésel, el 20 de septiembre de 2019, por medio de la resolución 40730, se estableció que el mandato disminuiría a B2 a fines de ese mes y aumentaría gradualmente hasta alcanzar un B10 a finales de diciembre.

b. Mandatos

El mandato de mezcla vigente para el bioetanol es E10, con excepción de tres departamentos fronterizos con Venezuela. En el caso del biodiésel, el reciente mandato del 10 % se incrementó a B12.

c. Aspectos impositivos y tributarios

A través de la Ley 1819 de 2016, en Colombia se estableció un impuesto al carbono aplicable a todos los combustibles fósiles, basado en el factor de liberación de CO₂ de cada combustible, expresado como el volumen o peso de este.

Desde 2002, para promover el uso y la producción de biocombustibles, el Gobierno eliminó el impuesto al valor agregado de estos y también los eximió de un impuesto global. Además, el etanol mezclado con gasolina está exento de impuestos locales.

Tabla 8. Tasas impositivas vigentes para los combustibles fósiles y los biocombustibles en Colombia.

Impuesto	Gasolina	Diésel	Biocombustibles
Impuesto global	COP 491.63/gal en la gasolina regular	COP 470.56/gal	Exento
Impuesto al valor agregado	19 %	19 %	Exento
Impuesto al carbono	COP 139.50/gal	COP 156.60/gal	Exento
Tarifa local	25 % del precio de referencia Precio de referencia a junio de 2020: COP 5358.99/gal	6 % del precio de referencia Precio de referencia a junio de 2020: COP 5736.1/gal	Exento si son mezclas de bioetanol Exento si es biodiésel

Nota: Los valores están expresados en pesos colombianos (COP). Las tarifas específicas son válidas para 2020 y se actualizan anualmente. Tipo de cambio utilizado USD 1 = 3690 COP.

Fuente: Elaborado con base en SICOM 2020.

Asimismo, el Gobierno establece fórmulas para calcular el precio de los biocombustibles en función del costo de oportunidad para utilizar estas materias primas en el abastecimiento de otros mercados. Esta situación de precios regulados de los biocombustibles ha favorecido a los productores locales.

d. Otros biocombustibles

En cuanto a la producción de biocombustibles avanzados en el país, si bien el sector privado y las universidades han realizado investigaciones, estos no se han desarrollado comercialmente.

5. Suecia

a. Marco general y normativo

Suecia es considerado un líder en la transición hacia una economía baja en carbono, ya que presenta la participación más baja de combustibles fósiles en el suministro de energía primaria entre los países miembros de la AIE y es el segundo país con menores emisiones de CO₂ por producto bruto interno (después de Suiza) y per cápita (después de México).

Según la AIE (2019), en junio de 2016 el Parlamento llegó a un convenio sobre el marco de la política energética del país, denominado Acuerdo Energético, que establece que la política energética debe combinar sostenibilidad ecológica, competitividad y seguridad de abastecimiento. Estos objetivos son coherentes con los de la política energética de la AIE y la UE.

En 2016, en el marco de este acuerdo, se estableció como objetivo para 2045 cero emisiones netas de GEI y, a partir de entonces, lograr emisiones negativas, para cuyo cumplimiento se espera en 2040 una participación del 100 % de las energías renovables en la generación de electricidad.

En lo que se refiere al sector del transporte, se busca una reducción de las emisiones de GEI del orden del 70 %, en relación con el período 2010-2030.

Como en la mayoría de los países, el sector del transporte depende significativamente de los derivados del petróleo; sin embargo, en los últimos años ha habido un aumento en el uso de los biocombustibles y, entre los miembros de la AIE, Suecia es el país con una mayor proporción de combustibles renovables en dicho sector.

En 2017 los biocombustibles representaron el 18 % del consumo final total en el transporte (17 % de biocombustibles líquidos y 1 % de biogás).

Inicialmente, el crecimiento de los biocombustibles se produjo mediante el bioetanol, con el respaldo de la “Pump Act”, que obliga a las grandes estaciones de servicio a ofrecer al menos una opción de biocombustible. Por lo tanto, este era el biocombustible más utilizado en mezclas bajas en gasolina o como combustible E85 en vehículos especiales.

En los últimos años el biodiésel se ha convertido en el principal biocombustible en el transporte por carretera, por medio de un rápido crecimiento del HVO.

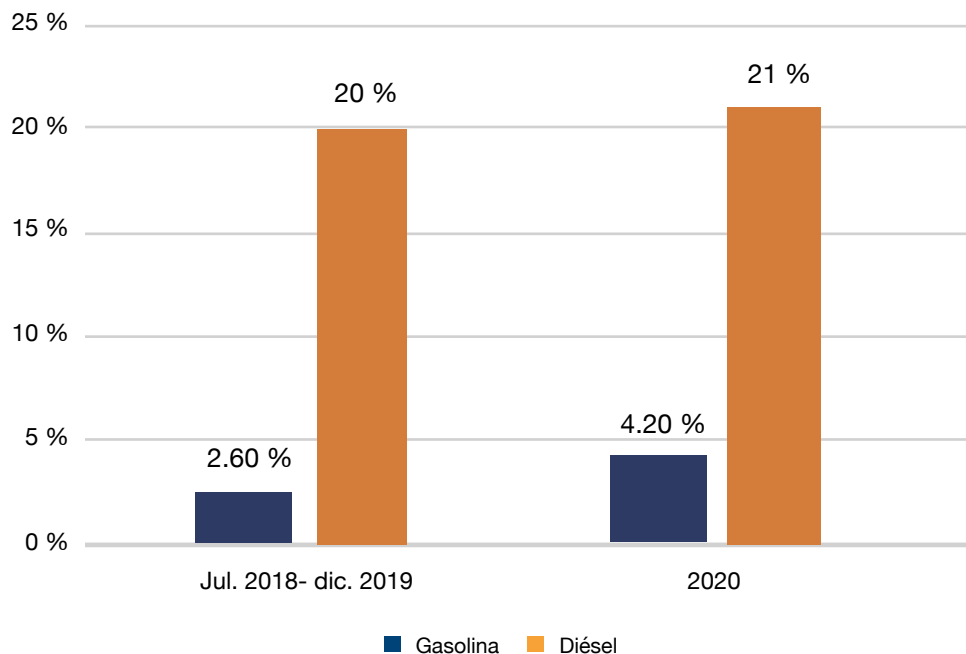
En relación con la producción nacional de biocombustibles, esta no ha seguido el ritmo del crecimiento del consumo, lo que llevó a que en 2017 las importaciones de biodiésel representaran el 75 % de todos los biocombustibles líquidos utilizados en el transporte.

b. Mandatos

Con respecto a la utilización de mandatos, de acuerdo con la Agencia Sueca de Energía (SEA 2020), la promulgación de la Ley 2017:1201 obliga a reducir las emisiones de GEI de la gasolina y el diésel, lo que ha permitido fomentar el uso de biocombustibles. Esto contribuirá a cumplir en 2030 el objetivo nacional de reducción del 70 % de emisiones de GEI en el transporte nacional. Para ello, los proveedores de combustibles deben cumplir progresiva y anualmente objetivos de reducción de dichas emisiones. En el período del 1.º de julio de 2018 al 31 de diciembre de 2019, los objetivos fueron de al menos 2.6% de emisiones de la gasolina y 20 % del diésel. Durante 2020 se establecieron en al menos 4.2% de la gasolina y 21 % del diésel.

También se establece que la autoridad supervisora cobrará un cargo por pagos atrasados a quienes tengan el deber de reducir emisiones y no lo informen y, a quienes no lo hayan cumplido durante un año calendario, se les cobrará una tasa de obligación de reducción, que no puede exceder los SEK 7/kg CO₂eq⁶³.

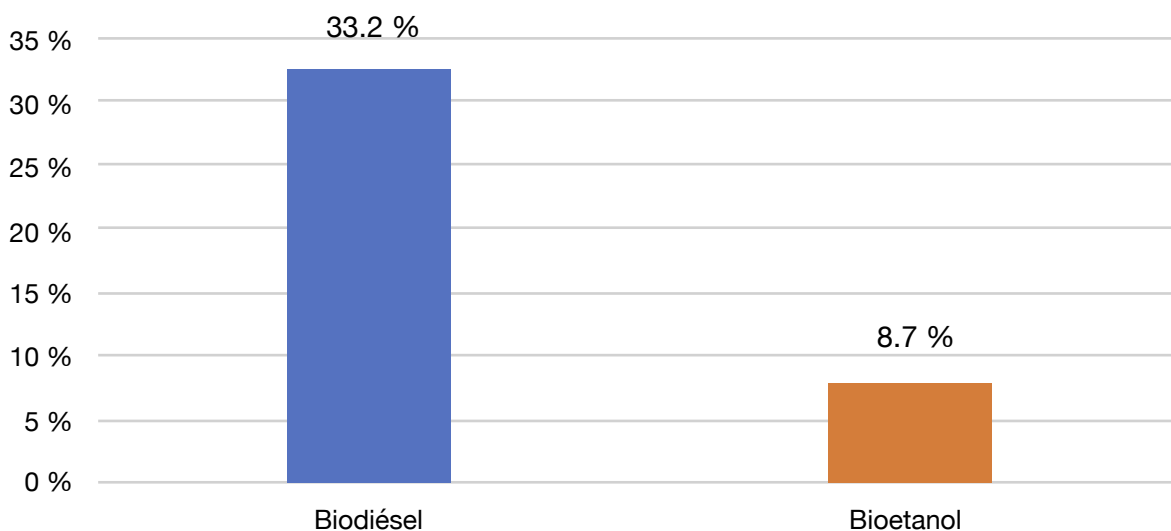
Ilustración 32. Mandato de reducción de emisiones de GEI de la gasolina y el diésel.



Fuente: Elaborado con base en SEA 2020.

Ello se tradujo en un elevado uso de mezclas de biocombustibles, especialmente de biodiésel, que representó el 33.2 % del total del diésel consumido, mientras que la mezcla efectiva de bioetanol en gasolinas fue de 8.7 % en 2019.

Ilustración 33. Mezcla efectiva de biocombustibles en 2019.



Fuente: Elaborado con base en Torroba 2020.

⁶³Tipo de cambio al 23 de marzo de 2021: EUR 1 = SEK 10.1813, EUR 1 = USD 1.1883. Obténgase más información en el sitio web del Banco Central Europeo: https://www.ecb.europa.eu/stats/policy_and_exchange_rates.

c. Aspectos impositivos y tributarios

En Suecia se aplica un impuesto a la energía y al carbono (AIE 2019). El primero en establecerse fue el gravamen a la energía, que en 1991 se complementó con la carga al carbono, que ha aumentado gradualmente para fomentar una transición energética sostenible.

El impuesto al carbono se elevó de SEK 0.25/kg en su introducción a SEK 1.15/kg en 2018 (alrededor de USD 140/t), convirtiéndose en el impuesto al carbono más alto del mundo.

Desde 1994 el impuesto al CO₂ se ajustó anualmente de conformidad con la inflación y, a partir de 2017, el Gobierno introdujo un incremento anual adicional de 2 % para permitir que los impuestos aumentasen según el crecimiento de dicho índice.

Junto con el relativo al carbono, el impuesto a la energía constituye un nivel impositivo total al consumo de combustible. Ambos se consideran fundamentales para reducir las emisiones de todos los sectores y cumplir con los objetivos de la política climática del país.

Entre 2000 y 2004 el Gobierno introdujo un programa de reforma fiscal verde y aumentó significativamente el impuesto al CO₂, pero redujo los impuestos a la energía para moderar el incremento total de impuestos. Estos niveles impositivos han dado lugar a altos precios en los combustibles. En el segundo trimestre de 2018 los consumidores pagaron el precio más alto del diésel de los países miembros de la AIE y el noveno más alto de la gasolina.

A partir del 1. ° de julio de 2018, al implementarse la obligación de la reducción de las emisiones, los impuestos a la energía y al carbono se redujeron en la gasolina y el diésel, a fin de evitar grandes aumentos que repercutieran en el consumidor.

En European Renewable Ethanol (ePure) (2020) se presentan los incentivos fiscales vigentes hasta finales de 2021. En torno al impuesto a la energía, se destacan las siguientes reducciones impositivas:

- 74 % al etanol y 8 % a FAME en mezclas bajas.
- 73 % al etanol (E85) y 50 % a FAME en mezclas altas.
- 100 % al HVO.

Asimismo, todos los biocombustibles están exentos del impuesto al carbono.

De acuerdo con la AIE (2019), en 2015 el Gobierno presentó el Programa Climate Leap (Klimatklivet), en apoyo a las inversiones en infraestructura local y regional para reducir las emisiones de GEI, proporcionándole aproximadamente 44 % de su presupuesto. La ejecución de los proyectos relacionados con el sector de vehículos eléctricos representa la mayor parte de este, seguido por los de conversión de energía y producción de biogás.

Otra medida implementada en busca de una transición a menores emisiones fue la implementación en 2018 del sistema bonus-malus, que proporciona un subsidio a la compra de vehículos con bajas emisiones.

d. Otros biocombustibles

En lo que refiere a la utilización de biocombustibles en otros sectores, Biofuels International (2020) destaca que Suecia es un país líder en la aviación sostenible, ya que tiene como objetivo introducir en 2021 un mandato de reducción de GEI en el combustible de aviación. El nivel de reducción será de 0.8 % en 2021 y aumentará gradualmente hasta llegar a 27 % en 2030.

6. *Finlandia*

a. Marco general y normativo

Según la AIE (2018), Finlandia estableció como normativas relevantes la Ley del Clima, que se promulgó en 2015 y en la que se fijaron metas para 2050. Posteriormente, en 2016 y 2017 se publicaron dos documentos donde se establecen acciones específicas para la concreción de dichas metas: la Estrategia Nacional de Energía y Clima para 2030 y el Plan de Política Climática de Mediano Plazo.

A través de estas normativas, el Gobierno fijó como objetivos:

- a) Para 2050 reducir entre 80 % y 95 % de las emisiones de GEI, en comparación con los niveles de 1990;
- b) Para 2030 disminuir las emisiones de GEI en 39 % en los sectores no incluidos en el Sistema de Comercio de Emisiones;
- c) Para 2030 eliminar gradualmente el uso de carbono en la producción de energía;
- d) Durante la década de 2020 impulsar la participación de las energías renovables en más del 50% del consumo de energía final;
- e) Para 2030 aumentar en 30 % la proporción de biocombustibles en el transporte por carretera.

En la Estrategia Nacional de Energía y Clima para 2030, Finlandia prevé reducir en 50 % el uso doméstico del petróleo, en comparación con los niveles de 2005, mediante una mayor eficiencia energética del sistema de transporte. Para lograr dicho objetivo se busca una renovación acelerada del parque de vehículos, por medio de la incorporación de 250 000 vehículos eléctricos y 50 000 vehículos que funcionan con gas y el aumento en 30 % en la proporción de biocombustibles en el transporte por carretera.

La política de biocombustibles se fija a través de la Ley de Promoción del Uso de Biocombustibles en el Transporte (446/2007) y la Ley de Biocombustibles y Biolíquidos (393/2013). En 2017 ambas leyes se modificaron para cumplir con la Directiva de la UE, cuyo objetivo es reducir los impactos indirectos del cambio de uso de la tierra. Estos instrumentos obligan a las empresas a suministrar combustibles para el transporte con una mezcla mínima promedio de biocombustibles (definida como porcentaje del contenido energético). Dicha directiva incluye disposiciones para la doble contabilización de biocombustibles avanzados.

Finlandia cuenta con una buena dotación de recursos forestales y una fuerte industria forestal orientada a la exportación, que va desde la madera hasta la pulpa y el papel. Los subproductos y los residuos de la madera se utilizan como combustibles en la generación de energía y calor o se procesan para producir biocombustibles de segunda generación, en particular, biodiésel, en lo cual la industria finlandesa es un líder mundial.

Desde 2007 el suministro de biocombustibles y residuos ha aumentado en un 30 %, representando más del 53 % de la producción total de energía nacional, con un crecimiento anual promedio en la última década de 2.7 %.

En 2017 la energía renovable representó el 85 % del total y el suministro de petróleo cayó 9 %, mientras que el de carbón, gas natural y turba disminuyó en casi 50 %.

Ese mismo año, dadas las medidas implementadas, Finlandia se ubicó como el segundo país entre los miembros de la AIE con mayor proporción de biocombustibles, que fue de 28.5 %.

El mercado de biodiésel tiene una gran predominancia. En 2016 el diésel renovable, que se puede mezclar sin limitaciones, representó el 62 % del consumo total de biocombustible en el transporte.

b. Mandatos

En cuanto al mandato vigente, la AIE (2018) indica que Finlandia se fijó el objetivo de 20 % de participación de los biocombustibles en 2020 (incluida la doble contabilización). Esto es coherente con una participación del 13.5 %, en la que el 7 % proviene de biocombustibles convencionales y el 6.5 %, de combustibles avanzados (contabilizados dos veces según las normas de la UE relativas a los biocombustibles avanzados). Dicho objetivo es dos veces más alto que el de energía renovable para el sector del transporte, establecido en la primera directiva de energía renovable de la UE.

Después de 2020 la doble contabilización ya no se aplicará. Las obligaciones en materia de biocombustibles bajarán del 20 % en 2020 al 18 % en 2021, para luego volver a aumentar en 1.5 % cada año hasta alcanzar 30 % en 2030. Con respecto a los objetivos relativos a los biocombustibles avanzados, se establece que aumentará en 2 % cada dos años, de 2 % en 2021 a 10 % en 2030.

c. Aspectos impositivos y tributarios

En relación con el marco impositivo, los impuestos aplicados a los combustibles de origen fósil generan una situación favorable para los biocombustibles.

En 2011 se realizó una reforma fiscal de la energía, los motores y otros combustibles, mediante la cual se tiene en cuenta el contenido energético y las emisiones de CO₂ y de partículas que tienen efectos adversos en la salud.

El componente del impuesto a la energía aplicado a motores y otros combustibles, que se ajustó para reflejar el contenido energético del combustible, se aplica a los combustibles fósiles y a los biocombustibles. Debido a esta reforma, los combustibles de transporte que generan menos emisiones tienen un impuesto sobre la energía reducido. El impuesto al CO₂ es proporcional al contenido energético.

Los biocombustibles se clasifican en tres categorías:

Los que incumplen los criterios de sostenibilidad, sujetos a los mismos impuestos de CO₂ que los combustibles fósiles.

Los sostenibles (de primera generación y origen agrícola), sujetos al 50 % del impuesto al CO₂, en comparación con los combustibles fósiles equivalentes.

- Los de segunda generación, exentos del impuesto al carbono.

Los consumidores finlandeses pagan precios relativamente altos por el combustible, en comparación con los países miembros de la AIE, debido de manera principal a los altos impuestos. En el tercer trimestre de 2017 Finlandia tenía el sexto precio más alto para el combustible diésel, el séptimo precio más alto para la gasolina.

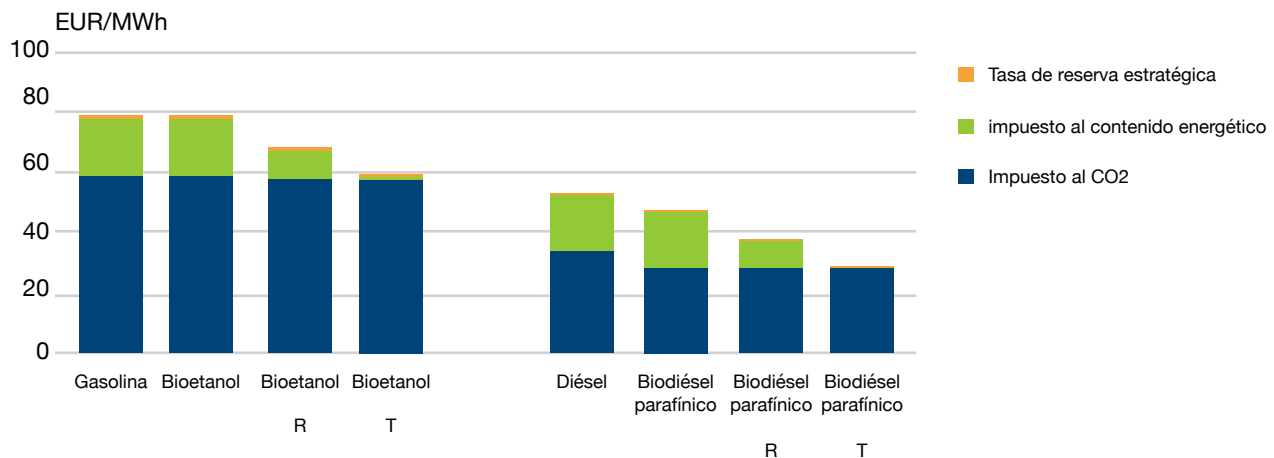
En el informe de ePURE (2020) se indica que las mezclas de gasolina y diésel lanzadas al mercado tienen tasas impositivas mínimas de €ct 35.9/l y €ct 33/l, respectivamente.

Además, los combustibles líquidos se gravan en función de su contenido energético y su intensidad de carbono: el etanol convencional y el avanzado se gravan a un tipo de €ct 43.03/l y €ct 35.98/l, respectivamente, mientras que la gasolina de motor se grava a €ct 75.96/l.

El biodiésel convencional y el avanzado se gravan a un tipo de €ct 43.3/l y €ct 32.04/l, respectivamente, mientras que el diésel se grava a €ct 59.48/l.

Desde agosto de 2020 se ha creado una clase impositiva diferente para los combustibles parafínicos, según la materia prima utilizada en su producción. El impuesto a los combustibles parafínicos a partir de materias primas fósiles es de €ct 51.2/l, de cultivos (HVO), €ct 39.6/l, y de desechos y residuos, €ct 28/l.

Ilustración 34. Tasas impositivas aplicadas a los combustibles para el transporte en 2018.



Fuente: Tomado de AIE (2018)

d. Otros biocombustibles

En relación con la producción de biocombustibles avanzados, el Gobierno y la industria de Finlandia impulsan grandes esfuerzos de I+D para desarrollar una amplia gama de nuevas tecnologías de producción de biocombustibles, que incluyen materias primas lignocelulósicas, HVO, el coprocesamiento de materias primas biológicas en refinerías de petróleo, biomasa para plantas de líquidos (BTL) por medio de la gasificación y el proceso FT, y bioetanol a partir de madera y paja.

Tabla 9. Principales aspectos de la política de biocombustibles de Indonesia, Malasia, Tailandia, Colombia, Suecia y Finlandia.

País	Principales normativas	Objetivos de utilización de la energía renovable y del biocombustible	Mandato actual	Mandato previsto	Fórmula de fijación de precios	Impuestos	Medidas de promoción	Biocombustibles avanzados
Indonesia	-Política Nacional de Biocombustibles (2006). Rige la adquisición y el uso de biocombustibles. -Regulación del MEMR, dic. 2015. Establece objetivos obligatorios para el biodiésel y el bioetanol. Objetivos: mejorar la balanza de pagos, lograr autosuficiencia energética y apoyar al sector del aceite de palma.	-23 % de energías renovables en 2025 y 31 % en 2050 ⁶⁴ -13.9 billones de litros de consumo de biocombustibles en 2025 y 52.3 billones de litros en 2050	Biodiésel: B30 Bioetanol: presenta objetivos obligatorios, pero no se produce ni se consume.	B40 para finales de 2022 o después	Biodiésel: (precio del aceite de palma IDR/kg + 80 \$/tonelada) x 870 kg/m ³ + costo de transporte Bioetanol (precio de la melaza IDR/kg x 4.125 kg/l) + 0.25 \$/l	Gravamen a la exportación de biodiésel y APC	-Subsidio a los productores para compensar la diferencia de precios entre el biodiésel y el diésel -Financiamiento de actividades de investigación sobre biocombustibles y promoción de la palma	-No hay producción a escala comercial. -En 2019 PERTAMINA y ENI firmaron un acuerdo para la producción de HVO.
Malasia	-Política Nacional de Biocombustibles (2006). Principales lineamientos. -Ley de la Industria de Biocombustibles (2007). Implementación del mandato de biodiésel. -Undécimo Plan de Malasia (2016-2020). Promoción del consumo interno de biodiésel y aumento de la mezcla efectiva. Objetivos: utilizar fuentes de energía sostenibles, reducir la dependencia de los combustibles fósiles y ayudar a estabilizar la industria del aceite de palma.	25 % en energías renovables para 2025.	Biodiésel: B10. Bioetanol: no tiene programa.	B20 para mediados de 2021 o después	Mecanismo automático de fijación de precios	Impuestos a la exportación de aceite de palma	-Subsidio ⁶⁵ al B10: si se supera el límite de precio de RM 2.18/litro, se activa el subsidio. -Fondos para construcción de instalaciones e infraestructura	-No hay producción a escala comercial. -Se realizan investigaciones para la producción a partir de biomasa del cultivo de palma.

⁶⁴Establecido en la Política Energética Nacional.

⁶⁵Límite en 2020 según el USDA, con un tipo de cambio al 15 de octubre de 2020 de MYR 4.15 = USD 1.

País	Principales normativas	Objetivos de utilización de la energía renovable y del biocombustible	Mandato actual	Mandato previsto	Fórmula de fijación de precios	Impuestos	Medidas de promoción	Biocombustibles avanzados
Tailandia	<p>-En 2007 se fijó un mandato para el biodiésel.</p> <p>-AEDP (2015). Fijó objetivos de consumo de energía renovable.</p> <p>-Objetivos: aumentar el uso de energía renovable en los hogares, la industria y promover el uso de biocombustibles y aumentar la eficiencia energética.</p>	<p>-Reducción de 110 a 140 millones de toneladas de CO₂ en 2030 (20-25 % de las emisiones de 2015).</p> <p>-30 % del total de la energía consumida de tipo renovable en 2036.</p> <p>-25 % del consumo de biocombustibles del uso total de energía combustible en 2036.</p>	<p>Biodiésel:</p> <p>-B10 (principalmente para transporte en carretera). Excluidas la industria y la agricultura.</p> <p>-Objetivo de consumo: 2.9 billones de litros en 2037.</p> <p>-Mezclas voluntarias: B7 y B20.</p> <p>Bioetanol:</p> <p>No tiene mandato.</p> <p>-Objetivo de consumo: 2.7 billones de litros en 2037.</p> <p>-Mezclas presentes: E10, E20 y E85.</p>	<p>Biodiésel:</p> <p>-B10 como mezcla principal.</p> <p>Bioetanol:</p> <p>-Objetivo de eliminación gradual, primero E10 de 91 octanos entre 2018 y 2022, luego E10 y E85 de 95 octanos entre 2023 y 2027 para convertir a E20 en la principal mezcla. Se ha retrasado por la incertidumbre sobre la falta de materia prima.</p>	<p>Precio al por mayor = precio de fábrica exrefinería + impuesto al consumo + impuesto municipal + fondo petrolero estatal + fondo de conservación.</p> <p>Precio al por menor: precio al por mayor + impuesto al valor agregado + margen de comercialización + impuesto al valor agregado</p>	<p>Impuesto al consumo</p> <p>Impuesto municipal</p> <p>Fondo petrolero estatal</p> <p>Fondo de conservación</p> <p>Impuesto al valor agregado</p>	<p>Subsidios al biodiésel: por lo cual B10 y 20 es THB 3/l (USD 0.36/gal) más barata que B7.</p> <p>Subsidios al bioetanol, por lo que la gasolina mezclada es entre 25 y 40 % más barata que la gasolina premium.</p> <p>-E20 subsidios de THB 2.28/l (USD 0.27/gal)</p> <p>-E85 de THB 7.13/l (USD 0.86/gal)⁶⁶</p> <p>-Eliminación de los subsidios para 2022</p> <p>-Tasas impositivas especiales a vehículos compatibles con E20 y E85</p>	<p>-No hay producción a escala comercial.</p> <p>-Oportunidad a futuro por la riqueza de las materias primas: residuos agrícolas asociados a cultivos, residuos forestales, cultivos energéticos no alimentarios</p>

⁶⁶Los valores de subsidios expresados para el biodiésel y el bioetanol corresponden a 2020.

País	Principales normativas	Objetivos de utilización de la energía renovable y del biocombustible	Mandato actual	Mandato previsto	Fórmula de fijación de precios	Impuestos	Medidas de promoción	Biocombustibles avanzados
Colombia	-Documento del Consejo Nacional de Política Económica y Social (2008). Lineamientos de política para promover la producción sostenible de biocombustibles. -Resolución 40185 (2018). Establece el mandato del bioetanol. -Resolución 40666 (2019). Establece el mandato del biodiésel. Objetivos: fortalecer y diversificar la matriz energética nacional, haciendo hincapié en la promoción de los biocombustibles.	-Reducción del 51 % de las emisiones en 2030 -Meta de reducción en el sector del transporte de 20.7 Mt CO ₂ eq	Biodiésel: B10 Bioetanol: E10 ⁶⁷	Biodiésel: este año se planea aumentar a B12.	Precio del biodiésel: se define como el mayor de los siguientes valores: el precio piso, el precio del fósil equivalente y el costo de oportunidad ⁶⁸ . El precio del bioetanol es el valor mínimo de dos magnitudes: el precio techo ⁶⁹ y el valor máximo que resulta de comparar un precio piso, el costo de oportunidad del azúcar ⁷⁰ y el precio del fósil equivalente.	En el biodiésel, a diferencia del bioetanol, la porción mezclada que tributa sobretasa al aceite combustible para motores (ACPM).	Biodiésel: exento de los impuestos al valor agregado, al carbono y al ACPM. Bioetanol: exento del pago de los impuestos al valor agregado, al carbono, a la gasolina y de la sobretasa a la gasolina.	-No existe producción a escala comercial. -El sector privado y universidades efectuaron investigaciones.

⁶⁷A excepción de tres departamentos fronterizos con Venezuela.

⁶⁸Se calcula a partir del precio de referencia del mercado interno de aceite de palma, con sus respectivos ajustes por calidad.

⁶⁹Corresponde al precio del mes anterior de referencia de la gasolina en Bogotá.

⁷⁰Toma como referencia el costo de oportunidad de los usos alternativos de la caña de azúcar para la producción de bioetanol en relación con el promedio móvil de los últimos seis meses de la paridad de la exportación del azúcar blanco refinado para evitar su volatilidad, descontando los costos de transporte al puerto de exportación, los gastos asociados y el beneficio que se obtiene al utilizar la vinaza generada en el proceso de producción de bioetanol en las actividades agrícolas.

País	Principales normativas	Objetivos de utilización de la energía renovable y del biocombustible	Mandato actual	Mandato previsto	Fórmula de fijación de precios	Impuestos	Medidas de promoción	Biocombustibles avanzados
Suecia	<p>-Acuerdo Energético (2016), establece que la política energética debe combinar: sostenibilidad ecológica, competitividad y seguridad de abastecimiento.</p> <p>-Pump Act. Establece la obligación de las estaciones de servicio de ofrecer al menos una opción de biocombustible.</p> <p>-Ley 2017:1201. Obligación de reducción de emisiones de la gasolina y el diésel.</p>	<p>-Cero emisiones netas de GEI en 2045 y a partir de entonces, emisiones negativas⁷¹.</p> <p>-Participación del 100 % de las energías renovables en la generación de electricidad en 2040.</p> <p>-Sector del transporte, reducción de las emisiones del orden del 70 %, en relación con el período 2010-2030.</p>	<p>-Obligación de reducción de emisiones de GEI de la gasolina y el diésel por parte de los proveedores de biocombustibles.</p> <p>-Objetivos de reducción progresivos y anuales.</p> <p>-En 2020, objetivos de al menos 4.2 % de la gasolina y 21 % del diésel.</p>	<p>A partir de 2020, aún no se han decidido los próximos niveles de reducción.</p>	<p>La UE publica todas las semanas los precios de venta al público y los precios sin impuestos de carburantes y combustibles referidos a los lunes de cada semana.</p> <p>Los precios de los combustibles se forman en función de: la cotización internacional de crudo y de los productos, la cotización de la divisa del país frente a la divisa en que cotiza el crudo y los productos (dólar), los impuestos vigentes y e margen de distribución y cotización.</p>	<p>Se aplica el impuesto a la energía que, junto con el impuesto al carbono⁷², forman un nivel impositivo total para el consumo de combustible.</p>	<p>Incentivos fiscales vigentes hasta finales de 2021, para el impuesto a la energía:</p> <p>-74 % para el etanol y 8 % para FAME en mezclas bajas.</p> <p>-73 % para el etanol (E85) y 50 % para FAME en mezclas altas.</p> <p>-100 % para el HVO.</p> <p>-Todos los biocombustibles están exentos del impuesto al carbono.</p>	<p>Líder en la aviación sostenible. Se fijó como objetivo la introducción de un mandato de reducción de GEI para el sector de la aviación en 2021.</p> <p>El nivel de reducción será de 0.8 % en 2021 y aumentará gradualmente hasta llegar a 27 % en 2030.</p>

⁷¹Establecido en el Acuerdo Energético.

⁷²En 2018 fue de SEK 1.15/kg (alrededor de USD 140/t), es decir, el impuesto al carbono más alto del mundo.

País	Principales normativas	Objetivos de utilización de la energía renovable y del biocombustible	Mandato actual	Mandato previsto	Fórmula de fijación de precios	Impuestos	Medidas de promoción	Biocombustibles avanzados
Finlandia	<p>-Ley del Clima (2015). Estableció metas para 2050.</p> <p>-Estrategia Nacional de Energía y Clima para 2030 y el Plan de Política Climática a Mediano Plazo. Aportan medidas de acción para cumplir las metas.</p> <p>-Ley de Promoción del Uso de Biocombustibles en el Transporte (446/2007) y Ley de Biocombustibles y Biolíquidos (393/2013). Fijan la política de biocombustibles. Obligan a las empresas a suministrar combustibles con una mezcla mínima promedio⁷³.</p>	<p>-Reducción de emisiones de GEI en 80 %-95 % para 2050, en comparación con los niveles de 1990.</p> <p>-Reducción de emisiones de GEI en los sectores no incluidos en el Sistema de Comercio de emisiones (no ETS) en 39 % en 2030.</p> <p>-Eliminación gradual del uso de carbón en la producción de energía en 2030.</p> <p>-Participación de las energías renovables en más del 50 % del consumo de energía final durante la década de 2020.</p> <p>-Aumento de 30 % en la proporción de biocombustibles utilizados en el transporte por carretera para 2030.</p>	<p>-Objetivo de 20 % de participación en biocombustibles en 2020 (incluida la doble contabilización)</p>	<p>-Objetivo de 30 % de biocombustibles en 2030</p> <p>-Objetivos para biocombustibles avanzados: 10 % en 2030</p>	<p>Los precios de los combustibles se forman en función de: la cotización internacional del crudo y de sus productos, la cotización de la divisa del país frente a la divisa en que cotiza el crudo y sus productos (dólar), los impuestos vigentes y el margen de distribución y cotización.</p>	<p>Impuesto a la energía (refleja el contenido energético del combustible) e impuesto al carbono</p>	<p>-Impuesto a la energía menor en comparación con las energías fósiles, dadas las menores emisiones</p> <p>_ Biocombustibles sostenibles (de primera generación) sujetos al 50 % del impuesto al CO₂, en comparación con los combustibles fósiles equivalentes</p> <p>_ Biocombustibles de segunda generación, exentos del impuesto al carbono</p>	<p>-Producción de biocombustibles de segunda generación, en particular, de biodiésel, en la que la industria de Finlandia es líder mundial.</p> <p>-Inversión en I+D para el desarrollo de nuevas tecnologías a partir de materias primas lignocelulósicas, el coprocesamiento de materias primas biológicas en refinerías de petróleo, la BTL mediante la gasificación y el proceso FT, y el bioetanol a partir de madera y paja.</p>

⁷³La obligación de mezcla se expresa como porcentaje del contenido energético.

Bibliografía consultada

- AIE (Agencia Internacional de la Energía, Francia). 2018. Energy policies of IEA countries: Finland 2018 review (en línea). París. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://www.iea.org/reports/energy-policies-of-iea-countries-finland-2018-review>.
- AIE (Agencia Internacional de la Energía, Francia). 2019. Energy policies of IEA countries: Sweden 2019 review (en línea). París. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://www.iea.org/reports/energy-policies-of-iea-countries-sweden-2019-review>.
- AIE (Agencia Internacional de la Energía, Francia). 2020a. Transport biofuels (en línea). París. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://www.iea.org/reports/transport-biofuels>.
- AIE (Agencia Internacional de la Energía, Francia). 2020b. World energy balances: energy balances for over 180 countries and regions (en línea). París. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances>.
- AIE (Agencia Internacional de la Energía, Francia). 2021a. Net zero by 2050: a roadmap for the global energy sector (en línea). París. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://www.iea.org/events/net-zero-by-2050-a-roadmap-for-the-global-energy-system>.
- AIE (Agencia Internacional de la Energía, Francia). 2021b. Renewable energy market update 2021: outlook for 2021 and 2022 (en línea). París. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update-2021>.
- BP (British Petroleum). 2020. BP statistical review of world energy 2019 (en línea). Londres, Reino Unido. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>.
- EIA (Administración de Información Energética de Estados Unidos). 2021. Country analysis executive summary: Malaysia (en línea). Washington D. C. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en https://www.eia.gov/international/content/analysis/countries_long/Malaysia/malaysia.pdf.
- ePURE (European Renewable Ethanol, Bélgica). 2020. New report: overview of biofuels policies and markets across the EU-27 and the UK (en línea). Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://www.epure.org/news/new-report-overview-of-biofuels-policies-and-markets-across-the-eu-27-and-the-uk/>.
- Equipo de Revisión por Pares del G20 2019 Japón. 2019. Indonesia's effort to phase out and rationalise its fossil-fuel subsidies: a report on the G20 peer-review of inefficient fossil-fuel subsidies that encourage wasteful consumption in Indonesia (en línea). Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en https://www.oecd.org/fossil-fuels/publication/G20%20peer%20review%20Indonesia_Final-v2.pdf.

- FEDEBIOCOMBUSTIBLES (Federación Nacional de Biocombustibles, Colombia). 2021. B12 para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (en línea). Bogotá. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en https://www.fedebiocombustibles.com/nota-web-id-3307-titulo-b12_para_mitigar_las_emisiones_de_gases_efecto_invernadero.htm.
- IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, Costa Rica). 2021. El ABC de políticas para el desarrollo y fortalecimiento de la bioeconomía. Manual de capacitación. San José, Costa Rica.
- IRENA (Agencia Internacional de las Energías Renovables, Emiratos Árabes Unidos). 2017. Renewable energy outlook: Thailand (en línea). Abu Dabi. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Nov/IRENA_Outlook_Thailand_2017.pdf.
- Martínez, A; Arcos, J; Benvides, J; Garay, H; Lloreda, R; Ramírez, J; Riaño, D; Uribe, E; Vera, J; Martínez, O; Zuur, A. 2019. Analizar y formular recomendaciones para la formación de los precios de los energéticos (diésel, gasolina, GLP, jet, gas natural, energía eléctrica, biocombustibles y carbón) y sus implicaciones fiscales, sociales, ambientales, energéticos y supranacionales aplicable al caso colombiano para la transición hacia un sistema energético moderno, seguro, confiable, asequible, y limpio: informe 3, recomendaciones finales (en línea). Bogotá, Colombia, FEDESARROLLO. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en https://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/3880/Repor_Noviembre_2019_Mart%C3%ADnez_et%20al.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- MinAgricultura (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Colombia); MinEnergía (Ministerio de Minas y Energía, Colombia); MinAmbiente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Colombia). 2019a. Resolución n.º 40666 (en línea). Bogotá. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en https://xperta.legis.co/visor/temp_legcol_481bf087-08ea-479b-9f78-a934c99f-caa4 .
- MinAgricultura (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Colombia); MinEnergía (Ministerio de Minas y Energía, Colombia); MinAmbiente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Colombia). 2019b. Resolución n.º 40730 (en línea). Bogotá. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/55-res%2040730%20de%202019.pdf> .
- MinEnergía (Ministerio de Minas y Energía, Colombia). 2018. Resolución n.o 40185 (en línea). Bogotá. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en https://www.minenergia.gov.co/documents/10180//23517//47710-res_40185_270218.pdf .
- OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, Francia). 2020. Fossil fuel support country note: Indonesia (en línea). París. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <http://stats.oecd.org/wbos/fileview2.aspx?IDFile=52efa13c-bd5d-4493-9dc6-9ba637821ae4>.

- Prasertsri, P; Chanikornpradit, M. 2020. Biofuels annual report: Thailand (en línea). Washington, D. C., Estados Unidos de América, USDA. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels%20Annual_Bangkok_Thailand_06-30-2020.
- Rahmanulloh, A. 2019. Indonesia Biofuels annual report 2019 (en línea). Washington, D. C., Estados Unidos de América, USDA. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/report/downloadreportbyfilename?filename=Biofuels%20Annual_Jakarta_Indonesia_8-9-2019.pdf.
- Rahmanulloh, A. 2020. Biofuels annual report: Indonesia (en línea). Washington, D. C., Estados Unidos de América, USDA. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels%20Annual_Jakarta_Indonesia_06-22-2020.
- Sapp, M. 2021. Malaysia and Indonesia forced to push back higher blending plans (en línea). The Digest, Florida, Estados Unidos de América; 7 ene. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2021/01/07/malaysia-and-indonesia-forced-to-push-back-higher-blending-plans/>.
- SEA (Agencia Sueca de Energía). 2020. Greenhouse gas reduction mandate (en línea). Estocolmo. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <http://www.energimyndigheten.se/en/sustainability/sustainable-fuels/greenhouse-gas-reduction-mandate/#:~:text=To%20encourage%20use%20of%20biofuels,a%20certain%20percentage%20every%20year>.
- SICON (Sistema de información de la cadena de distribución de combustibles del Ministerio de Minas y Energía) 2020.
- Sweden becomes a frontrunner in sustainable aviation (en línea). 2020. Biofuels International, Londres, Reino Unido; 17 sep. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://biofuels-news.com/news/sweden-becomes-a-frontrunner-in-sustainable-aviation/>.
- TE (Federación Europea de Transporte y Medio Ambiente, Bélgica). 2020. Making aviation fuel mandates sustainable: an analysis of aviation fuel mandates in seven European states (en línea). Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2020_12_Aviation_SAF_mandates_rating_final.pdf.
- Torroba, A. 2020. Atlas de los biocombustibles líquidos 2019-2020 (en línea). San José, Costa Rica, IICA. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/13974/BVE20128304e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- USDA (United States Department of Agriculture). 2019. Biofuels Annual reports-Indonesia. Washington, D. C., Estados Unidos de América.
- USDA (United States Department of Agriculture). 2020a. Biofuels Annual reports-Tailandia. Washington, D. C., Estados Unidos de América.

USDA (United States Department of Agriculture). 2020b. Biofuels Annual reports-Colombia. Washington, D. C., Estados Unidos de América.

Verzani, W. 2020. Biofuels annual report: Malasya (en línea). Washington, D. C., Estados Unidos de América, USDA. Consultado 23 de julio de 2021. Disponible en https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels%20Annual_Kuala%20Lumpur_Malaysia_10-26-2020.

Conclusiones

Los biocombustibles pueden contribuir significativamente a la descarbonización del sector del transporte por carretera, especialmente en el corto y el mediano plazo, así como en los sectores del transporte marítimo y aéreo en los plazos mediano y largo.

Además, la diversificación en el uso integral y eficiente de la biomasa para producir biocombustibles no solo ayuda a reducir las emisiones de GEI, sino también permite agregar valor y generar empleo y puede contribuir a que los sistemas agroalimentarios sean más eficientes y seguros. En tal sentido, la economía de variedad generada en torno a la producción de coproductos desempeña un rol importante.

En los últimos veinte años la producción y el consumo de bioetanol y biodiésel en el transporte terrestre, mezclados con combustibles fósiles o en estado puro, han presentado un rápido crecimiento (parcialmente interrumpido en 2020 a raíz de la COVID-19). El desarrollo de estos biocombustibles ha sido impulsado por la articulación de una nueva institucionalidad y la formulación de políticas públicas, de conformidad con tres fundamentos: a) sus ventajas en materia medioambiental y de calidad del aire, b) la seguridad y diversificación energética y c) el desarrollo agrícola y sus impactos económicos positivos.

Las políticas públicas y la institucionalidad de los biocombustibles son un tema transversal que incluye cuestiones ambientales, energéticas, agrícolas, económicas y de comercio exterior, debido a lo cual las autoridades de aplicación pueden tener uno o varios reguladores gubernamentales en dichas materias.

Cabe destacar que las fuentes de energía fósiles, los biocombustibles y otras fuentes renovables coexisten en un mercado donde las señales de precios –que asignan los recursos actuales e indican las escaseces futuras– se tornan cruciales. No obstante, mientras que para las energías de fuentes fósiles el mercado ya está establecido y funciona –incluso con distorsiones–, respondiendo a las señales de precios, en el caso de los biocombustibles dichas señales son todavía difusas e imperfectas en su función de crear y establecer las rutinas de funcionamiento del mercado.

La transición entre ambos modelos está condicionada a cada sociedad en particular y, en todos los casos, a la fuerte inercia institucional previa y de las futuras intervenciones estatales. El establecimiento de mecanismos para internalizar algunas de las externalidades negativas, especialmente las ambientales, resultarán cruciales para la formulación de señales de precio y la articulación de mercados de biocombustibles, en especial si se piensa en su masificación.

La articulación y el funcionamiento de los mercados de los biocombustibles guardan una estrecha relación con el desarrollo de la industria, destacándose tres marcos normativos que dictan los diferentes mecanismos de funcionamiento de los mercados: a) los promocionales, b) los de transición y c) los de libre competencia. Cada una de estas tres estructuras refleja, en parte, el nivel de desarrollo de la industria y los diferentes grados de protección/regulación estatal en torno a ellas.

En tal sentido y, en virtud del tipo de marco normativo aplicado, las autoridades de regulación deberán normar y/o regular varios aspectos: la definición de los precios de los biocombustibles a través de sus diferentes mecanismos (fórmulas, licitaciones, etc.), el establecimiento de cuotas específicas de mercado, la definición del marco impositivo aplicable, las cuestiones de seguridad y calidad de la producción y el consumo y las normas sobre emisiones.

Cada país ha avanzado en la formulación e implementación de políticas públicas de biocombustibles, en las que influye de forma significativa su disponibilidad de materias primas biológicas industrializables como combustibles biológicos, su posición relativa como exportador o importador de petróleo y combustibles derivados, así como sus compromisos y metas medioambientales relacionados principalmente con la emisión de GEI y la calidad del aire.

En tal sentido y, en virtud del tipo de marco normativo aplicado, las autoridades de regulación deberán normar y/o regular varios aspectos: la definición de los precios de los biocombustibles a través de sus diferentes mecanismos (fórmulas, licitaciones, etc.), el establecimiento de cuotas específicas de mercado, la definición del marco impositivo aplicable, las cuestiones de seguridad y calidad de la producción y el consumo y las normas sobre emisiones.

Cada país ha avanzado en la formulación e implementación de políticas públicas de biocombustibles, en las que influye de forma significativa su disponibilidad de materias primas biológicas industrializables como combustibles biológicos, su posición relativa como exportador o importador de petróleo y combustibles derivados, así como sus compromisos y metas medioambientales relacionados principalmente con la emisión de GEI y la calidad del aire.

A raíz de sus condicionamientos y características particulares, se observa que más de 50 países han avanzado en la formulación de políticas públicas para el uso de biocombustibles líquidos. Además, se observa una tendencia a un aumento porcentual en su consumo, mediante un número mayor de mandatos establecidos en muchos países, mientras que la maduración de la industria permite al sistema evolucionar con un esquema menos regulado e incorporando innovaciones y tecnologías que se traducen en ganancias de eficiencia productiva de los biocombustibles, a la vez que la producción de coproductos cada vez toma un mayor relieve productivo.

Anexo. Parámetros de la calidad del biodiésel y el bioetanol combustible.

Los parámetros que definen la calidad del biodiésel se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- * Propiedades generales (densidad, viscosidad, puntos de inflamación, de enturbiamiento y de fluidez, número de cetano).
- * La composición química y la pureza de la mezcla de ésteres metílicos de ácidos grasos (contenido de alcohol y de éster, porcentaje de mono, di y triglicéridos, así como de glicerol libre y total, número de yodo).

Tabla 10. Límites de especificación en el biodiésel: propósito, importancia y efectos de su desviación.

Propiedad	Propósito/importancia/posibles efectos de la desviación de la especificación
Contenido de éster (mínimo)	Valores inferiores a la especificación indican una reacción incompleta/presencia de aceite. Estos provocarán una alta viscosidad, una disminución del efecto espray, un aumento en la carbonilla y una combustión deficiente.
Densidad (15° C)	Depende del aceite de partida y del proceso de transesterificación. Un valor bajo indica un resto excesivo de alcohol.
Viscosidad (40° C)	Su fin es la satisfactoria combustión del combustible. El valor de la viscosidad debe ser el mismo del diésel convencional. Se deben evitar valores mayores de viscosidad que el diésel; sin embargo, una viscosidad que tiende a un valor más bajo del rango de la especificación puede resultar ventajosa para motores que requieran menor potencia en la bomba de inyección y en la salida de los inyectores. Bajos valores indican un exceso de metanol, mientras que los altos indican degradación térmica y oxidativa y presencia de aceite sin reaccionar, por lo que pueden provocar problemas en los inyectores y en el sistema de bombeo; además, ello acorta la vida del motor.
Punto de inflamación (mínimo)	Se refiere a la seguridad contra incendios. Se utiliza como mecanismo para limitar el nivel de alcohol sin reaccionar que permanece en el biodiésel terminado. Normalmente, el punto de inflamación del biodiésel es mayor que el del diésel. Un valor bajo puede causar problemas en el manipuleo, el transporte y el almacenamiento.

Propiedad	Propósito/importancia/posibles efectos de la desviación de la especificación
Azufre	Se refiere a la protección del sistema catalítico del escape. El biodiésel generalmente contiene menos de 15 ppm de azufre. Se recomienda utilizar el método de ensayo ASTM D 5453 con el biodiésel. El uso de otros métodos de ensayo puede dar resultados erróneos al analizar B100 con niveles de azufre extremadamente bajos (menos de 5 mg/kg). Un valor alto indicaría contaminación del biodiésel y provocaría mayores emisiones de SO ₂ .
Número de cetano (mínimo)	Guarda relación con el buen desempeño del motor. Es una medida de la calidad de ignición del combustible y del proceso de combustión. Los requerimientos de número de cetano dependen del tamaño y el diseño del motor, la naturaleza de las variaciones de velocidad y carga, de las condiciones atmosféricas, así como de la materia prima y el nivel de oxidación del biodiésel. Un valor bajo indica poca tendencia a la autoignición y supondría una mayor cantidad de depósitos en el motor y un mayor desgaste en los pistones.
Contenido de agua	Un exceso de agua en el biodiésel puede ocasionar problemas de hidrólisis (aparición de ácidos grasos libres).
Agua y sedimentos	Este control se dirige a prevenir la corrosión y la proliferación de organismos. Se establece al mismo nivel del diésel convencional. Un exceso de agua puede causar corrosión y crear un ambiente propicio para la proliferación de microorganismos. La oxidación puede incrementar el nivel de sedimentos, por lo tanto, este análisis debe ser usado junto con el de número ácido y viscosidad para determinar el grado de oxidación del combustible durante su almacenamiento. Un exceso de agua puede ocasionar problemas de hidrólisis (aparición de ácidos grasos libres). La presencia de sedimentos/contaminación depende de insaponificables en la materia prima y el proceso de producción. Un valor alto indica la presencia de insaponificables, jabones e impurezas mecánicas. Los primeros dejan residuos en el motor porque tienen un punto mayor de evaporación, los jabones generan cenizas sulfatadas y las impurezas mecánicas obstruyen los filtros.

Propiedad	Propósito/importancia/posibles efectos de la desviación de la especificación
Corrosión de la lámina de cobre	Se trata de dificultades con los componentes de bronce, latón o cobre de los vehículos. La presencia de ácidos o de compuestos con azufre puede deteriorar la lámina de cobre, lo que posibilita un ataque corrosivo. Valores altos causan problemas de corrosión durante el almacenamiento y en el motor.
Metanol	Depende exclusivamente del proceso de producción. Los restos de metanol generan una baja temperatura de inflamación, viscosidad y densidad, así como corrosión en las piezas de aluminio y zinc.
<p>Glicerina libre</p> <p>Glicerina total</p>	<p>Se refiere a un buen desempeño a bajas temperaturas. La glicerina total comprende la glicerina libre y la porción de glicerina de aceite o de grasa sin reaccionar o que ha reaccionado parcialmente.</p> <p>Niveles bajos de glicerina total aseguran una alta conversión del aceite o de la grasa hacia sus monoalquilésteres. La cantidad de glicerina libre depende del proceso de producción.</p> <p>Un valor alto indica una mala decantación y lavado del biodiésel, que provoca un incremento en las emisiones de aldehídos y acroleína. Altos niveles de mono, di y triglicéridos, así como de glicerina libre pueden producir depósitos en los inyectores y afectar adversamente la operación en climas fríos, causando el taponamiento de los filtros.</p>
Índice/n.º de iodo	Depende exclusivamente de la materia prima y cuantifica el grado de insaturación. Valores altos indican una gran presencia de dobles enlaces que favorecen los procesos de polimerización e hidrólisis.
Índice de acidez	Su determinación se emplea para fines de protección del motor. Se utiliza para determinar el nivel de ácidos grasos libres o ácidos de proceso que pueden estar presentes en el biodiésel. Un alto número ácido puede aumentar la degradación del biodiésel, la formación de depósitos en los sistemas de inyección y la probabilidad de corrosión.

Propiedad	Propósito/importancia/posibles efectos de la desviación de la especificación
Metales alcalinos (Na + K) y del grupo II (Ca + Mg)	Su presencia depende del proceso de producción. Los metales producen depósitos y catalizan reacciones de polimerización. Valores altos de (Na + K) indican restos de catalizador. Valores altos de (Ca + Mg) suponen la presencia de jabones insolubles.
Filtrabilidad en frío	Su función es determinar, por medio del tiempo de filtración luego de un tratamiento a baja temperatura, la adecuada operabilidad en frío del B100 para ser mezclado con diésel, como mínimo en el punto de nube. Algunas sustancias solubles o aparentemente solubles en biodiésel a temperatura ambiente, bajo enfriamiento o estadía prolongada a temperatura ambiente se separan de la solución. Estas sustancias pueden causar taponamiento de los filtros. Este método de ensayo proporciona un medio acelerado para medir la tendencia de estas sustancias a taponar los filtros. Cuanto más elevados son los valores de tiempo de filtración, mayor es la probabilidad de taponamiento de los filtros y mayores los problemas de operabilidad a bajas temperaturas.
Contaminación total	Se refiere a los sedimentos como en la sección “agua y sedimentos”.
Residuo carbonoso	Protege el motor. Mide la tendencia a la formación de depósitos de carbón generados por un destilado de petróleo; aunque no tenga una estricta correlación directa con los depósitos en el motor, esta propiedad se considera simplemente una aproximación al respecto. Depende exclusivamente del proceso de transesterificación. Un valor elevado indica un alto contenido de glicéridos y la presencia de metales (jabones, restos de catalizador) u otras impurezas.

Propiedad	Propósito/importancia/posibles efectos de la desviación de la especificación
Cenizas sulfatadas	Su propósito es lograr una satisfactoria combustión del combustible. Los materiales que forman cenizas pueden estar presentes en el biodiésel en tres formas: 1) sólidos abrasivos, 2) jabones metálicos solubles y 3) catalizadores no removidos. Los sólidos abrasivos y los catalizadores no removidos pueden afectar los inyectores, los filtros y la bomba de inyección, además de generar desgaste en los pistones y anillos y depósitos en el motor. Los jabones metálicos solubles tienen poco efecto en el desgaste, pero pueden afectar los empaques, contribuir al taponamiento de los filtros y generar depósitos en el motor.
Estabilidad a la oxidación (a 110° C)	Su valor depende de la materia prima y del proceso de producción. Se permite el uso de aditivos para mejorar este parámetro. Un bajo valor indica la presencia de aceite de partida degradado o la degradación del biodiésel en el proceso. Un tiempo inferior al especificado no aseguraría la estabilidad del biodiésel durante su almacenaje y distribución.
Éster metílico ácido	Depende de la materia prima (contenido de C18:3). Valores altos producen un valor bajo de POFF, un bajo n.o de cetano y un alto índice de yodo.
Contenido de monoglicérido y diglicérido	Depende del proceso. Indica una reacción incompleta, ya que son restos de aceite que no ha terminado de reaccionar. Altos valores provocan depósitos (inyectores, cilindros) y cristalización (tienen un mayor punto de fusión y una baja solubilidad en biodiésel).
Contenido de triglicérido	Depende del proceso. Un valor elevado indica la presencia de aceite o grasa sin reaccionar. Ocasionará una elevada viscosidad del biodiésel y depósitos en cilindros y válvulas.
Contenido de éster metílico poliinsaturado (cuatro o más dobles enlaces)	Depende de la materia prima (contenido de metiléster con cuatro o más dobles enlaces). Valores altos favorecen los procesos de polimerización que producen depósitos y deterioran el aceite lubricante.

Propiedad	Propósito/importancia/posibles efectos de la desviación de la especificación
Fósforo	La finalidad de determinar su contenido es prevenir daños en el convertidor catalítico. El fósforo puede deteriorar los sistemas de control de emisiones y tratamiento de gases de escape, razón por la cual su contenido debe ser bajo. Contenidos elevados indicarían un mal blanqueado del aceite de partida y la presencia de insaponificables.
Temperatura atm. equivalente (90 % R)	Este control se usa para asegurar que el biodiésel no ha sido contaminado con materiales de alto punto de ebullición, como aceites lubricantes gastados.
Punto de enturbiamiento	Se emplea para determinar un buen desempeño a bajas temperaturas. Define la temperatura a la cual aparece una nube o nubosidad de cristales en el combustible, bajo condiciones de ensayo prescritas, las cuales causan problemas de operación en climas fríos.
Punto de obstrucción del filtro en frío (POFF)	El valor de POFF es un indicador de los límites de operabilidad. Este valor depende de la materia prima y del proceso de producción (impurezas mecánicas).

Fuente: Elaborado con base en ARPEL e IICA 2009.

Tabla 11. Especificaciones técnicas para el bioetanol.

Propiedad	Importancia/posibles efectos de la desviación de la especificación
Aspecto y color	<p>-Permiten evaluar la presencia de impurezas provenientes del proceso productivo, un transporte inadecuado, la contaminación con otros productos o con herrumbre.</p> <p>-El oscurecimiento también puede ocurrir debido a la oxidación de compuestos inestables presentes (alcoholes superiores y aldehídos).</p> <p>-La presencia de impurezas puede llevar a la reducción de la vida útil de los filtros de combustible de los vehículos. Puede causar la formación de depósitos u obstrucciones en los carburadores en automóviles antiguos o en piezas móviles de los motores, como también en la inyección electrónica de los automóviles más modernos.</p>
Acidez total	<p>-Refleja el poder corrosivo del etanol.</p> <p>-La acidez puede provocar corrosión en el circuito de combustibles, además de reflejar un grado de etanol inferior al deseado.</p>
Conductividad eléctrica	<p>-Se relaciona directamente con la cantidad de iones presentes en el etanol.</p> <p>-Cuantos más iones tenga, más conductor será, pudiendo ser más corrosivo y/o agresivo para los materiales del circuito de distribución del combustible en el automóvil.</p> <p>-Muchas veces puede evidenciar contaminación con base, usada para neutralizar la acidez del etanol.</p>
Masa específica (densidad)	<p>-Se trata de la medida indirecta de la proporción de agua y alcohol en el combustible.</p> <p>-Si es elevada, puede indicar la presencia de una gran cantidad de agua.</p> <p>-Si es muy baja, indica la presencia de componentes livianos, como metanol y aldehídos, que pueden causar más polución al medio ambiente.</p> <p>-Como los motores se ajustan considerando el poder calorífico y, en consecuencia, el contenido energético por litro de combustible abastecido, la densidad es una propiedad que debe ser monitoreada continuamente en diferentes etapas de la distribución del producto.</p>

Propiedad	Importancia/posibles efectos de la desviación de la especificación
Grado alcohólico	<ul style="list-style-type: none"> -Refleja el grado de pureza del etanol. -Permite evaluar especialmente la presencia de agua.
Grado de hidrocarburos	<ul style="list-style-type: none"> -Refleja el grado de contaminantes orgánicos no oxigenados, principalmente la gasolina o los solventes petroquímicos que pueden contaminar el etanol durante el manejo, cuando se comparten equipos, tanques u otros ductos. -Su medición garantiza el grado de etanol adecuado.
Grado de etanol	<ul style="list-style-type: none"> -No es un análisis de rutina: se realiza cuando se sospecha la presencia de otros alcoholes además del etanol (metanol o de alcoholes superiores).
Grado de iones: cloruro, sulfato, hierro, sodio	<ul style="list-style-type: none"> -La presencia de estos iones aumenta la conductividad y refleja el poder corrosivo del etanol. -El cloruro es muy agresivo para los aceros utilizados en los motores y otras piezas en contacto con el combustible. -El ion hierro, dada la formación de óxido de hierro, puede generar procesos corrosivos en equipos, líneas de transporte y almacenamiento, lo que puede provocar obstrucciones en las partes móviles de los motores. -Un elevado grado de sodio puede indicar el uso de base (NaOH) para ajuste de pH, antes de la fermentación. -El sulfato puede ser adicionado al etanol en el proceso, una vez que las levaduras son tratadas con ácido sulfúrico. El sulfato es muy corrosivo y aún en niveles bajos lleva a la formación de depósitos en los circuitos de distribución de combustibles de los automóviles. -El cloro puede indicar contaminación con agua de mar, especialmente cuando el transporte es de tipo marítimo.
Grado de iones cobre	<ul style="list-style-type: none"> -Su presencia cataliza las reacciones de la oxidación y de la formación de goma (producto macromolecular proveniente de la polimerización de olefinas), que es un material capaz de depositarse y obstruir los filtros y el circuito de distribución de combustible, poniendo en riesgo el funcionamiento de los automóviles. -Dados sus impactos negativos, en las fábricas de producción de etanol de Brasil sustituyeron el cobre por acero inoxidable.

Propiedad	Importancia/posibles efectos de la desviación de la especificación
Azufre	<ul style="list-style-type: none"> -El etanol prácticamente no contiene azufre. -Desnaturalizantes como gasolinas ricas en azufre pueden introducir este elemento en el etanol combustible. -El azufre contamina los catalizadores, lo que causa el aumento de emisiones.
Fósforo	<ul style="list-style-type: none"> -Puede ser adicionado al etanol a través de la planta de origen (caña, maíz, remolacha, etc.) o de los agroquímicos. -Es un poderoso contaminante de catalizadores automotrices, que puede aumentar en los contenidos de las emisiones.

Fuente: Elaborado en base en CEPAL 2006.

Bibliografía consultada

ARPEL (Asociación Regional de Empresas de Petróleo y Gas Natural en Latinoamérica y el Caribe, Uruguay); IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, Costa Rica). 2009. Manual de biocombustibles. Montevideo, Uruguay.

CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Chile). 2006. Biocombustibles Líquidos para Transporte en América Latina y el Caribe. Santiago, Chile.



INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERACIÓN PARA LA AGRICULTURA
SEDE CENTRAL / Apdo. 55-2200 San José,
Vázquez de Coronado, San Isidro 11101, Costa Rica
Tel.: (+506) 2216-0222 / Fax: (+506) 2216-0233
Dirección electrónica: iicahq@iica.int / Sitioweb: www.iica.int

Biocombustibles líquidos:
institucionalidad y formulación de políticas
públicas