



Aviación con cero emisiones netas en América Latina y el Caribe: rutas y compensaciones

Informe final

Marzo de 2026



Agradecimiento

ICF agradece la contribución y el apoyo del equipo de ALTA, del Comité Ejecutivo de ALTA, de las aerolíneas miembro y de las autoridades de México, Chile y Brasil a lo largo de la elaboración de este informe. ICF también agradece a Cirium, S&P Global Energy y a la Universidad de San Andrés su apoyo en materia de datos.



Resumen ejecutivo

Introducción y contexto

La aviación es esencial para la conectividad y el desarrollo económico en la región de América Latina y el Caribe (LAC) puesto que contribuye con el 3,6 % del producto interno bruto (PIB) regional y sustenta el 2,9 % del empleo en 2023¹. La región abarca casi 22 millones de kilómetros cuadrados, con una geografía caracterizada por cordilleras, selvas tropicales y desiertos. Esto hace que el transporte aéreo sea esencial para conectar comunidades, empresas y mercados turísticos. Sin embargo, el mercado de la aviación en LAC sigue siendo considerablemente más pequeño comparado con mercados más maduros. Un indicador claro es la propensión para viajar en transporte aéreo: mientras que los pasajeros de América del Norte (Estados Unidos y Canadá) realizan una media de unos 2,5 viajes aéreos per cápita al año, la media en LAC es de aproximadamente 0,67 viajes per cápita². Esta gran brecha refleja la menor madurez del mercado y las disparidades económicas presentes entre los países. Destaca la importancia de garantizar la asequibilidad del transporte aéreo en una región en la que la conectividad aún está en desarrollo y cuyo papel es fundamental para el desarrollo económico y social³.

Las aerolíneas de la región han logrado avances e inversiones significativos para reducir las emisiones. Las aerolíneas de LAC operan una de las flotas más jóvenes y eficientes en cuanto a consumo de combustible a nivel global, lo que les permite aprovechar las ventajas de la aviación con las menores emisiones posibles. Por ejemplo, la proporción de asientos-kilómetro disponibles (ASK) volados por aeronaves de nueva generación en LAC (38 %) es mayor en comparación con economías más desarrolladas, tales como Europa (34 %), Estados Unidos y Canadá (34 %) y Asia (26 %). Las aerolíneas también han logrado avances significativos en la implementación de eficiencias operativas (correspondientes a los procedimientos bajo su control).

Sin embargo, lograr emisiones netas cero para la aviación en LAC requiere medidas y apoyo adicionales. Existen muchos obstáculos, entre ellos las disparidades económicas y de desarrollo, la infraestructura limitada y las diversas capacidades regulatorias. El PIB per cápita de la región sigue siendo significativamente inferior al de Europa o Norteamérica, lo que puede limitar su capacidad para absorber los mayores costos asociados con las medidas de aviación sostenible⁴. Esto podría llevar a una reducción de la demanda de transporte aéreo y restringir injustamente el desarrollo social y económico de la región.

Se necesita un enfoque adaptado a las características regionales de LAC. La región cuenta con numerosas ventajas, recursos y retos únicos para reducir las emisiones de la aviación. Reconociendo el principio de la CMNUCC de responsabilidades comunes pero diferenciadas y capacidades respectivas, este estudio evalúa las circunstancias y la estrategia para que LAC reduzca sus emisiones de la aviación y tiene como objetivo proporcionar un marco de trabajo común para las discusiones⁵.

A medida que crecen las economías y las poblaciones, la industria aeronáutica regional seguirá aumentando para garantizar que un mayor número de personas tenga acceso a los beneficios del sector. Se prevé que las tasas de viajes per cápita en LAC crezcan de manera constante, con una CAGR del 2,7 % entre 2019 y 2050⁶. Si bien este crecimiento es crucial para las economías en desarrollo, también aumenta los retos medioambientales que deben ser mitigados.

LAC está entrando en una fase crucial en el proceso para reducir las emisiones de la aviación. Este estudio, encargado por ALTA y sus miembros y desarrollado en colaboración con ICF, proporciona un marco de trabajo regional para apoyar la transición hacia las emisiones netas cero para 2050. Tiene en cuenta la metodología

¹ ATAG - *Aviation benefits beyond borders*.

² Norte América, incluyendo Estados Unidos y Canadá. Calculado a partir de un análisis de ALTA y usando datos económicos de la IATA.

³ ALTA - <https://alta.aero/en/news/trafico-aereo-en-america-latina-y-el-caribe-crecio-38-interanual-en-2025/>, IATA - <https://www.iata.org/en/pressroom/2025-releases/2025-08-04-01/>

⁴ Base de datos del PIB del Banco Mundial

⁵ <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>.

⁶ ALTA - Route to sustainability in Latin America and the Caribbean

del Objetivo Aspiracional a Largo Plazo (LTAG) de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), que establece un punto de referencia global para la acción climática en la aviación, al tiempo que reconoce las diversas circunstancias de la región⁷.

Este estudio investiga los cuatro mecanismos claves que, según la opinión generalizada, harán posible que la aviación logre emisiones netas cero: (1) Tecnología (modernización de flota), (2) mejoras en la eficiencia operativa, (3) reducción de las emisiones de carbono fósil y (4) mecanismos de carbono. Los tres primeros mecanismos son los mismos que tiene en cuenta el LTAG, lo que garantiza la consistencia con los estándares internacionales. Este estudio va más allá y explora la oportunidad de adoptar medidas fuera del sector, tales como los créditos de carbono, para abordar las emisiones de la aviación (aunque el LTAG no los tiene en cuenta). Esto debido al impacto positivo que las aerolíneas podrían tener en los frágiles ecosistemas de importancia global ubicados en la región.

Las aerolíneas en LAC operan una flota eficiente, con beneficios cada vez mayores a medida que se incorporan a la flota aeronaves más eficientes en cuanto al consumo de combustible

La renovación de flota en la región se aceleró después del COVID: las aeronaves de nueva generación representan el 19 % de los vuelos, frente al 2 % en 2019. Dado que estas aeronaves más nuevas también suelen operar rutas más largas, esto representa el 38 % de los ASK. Las aerolíneas han retirado activamente las aeronaves más antiguas después del COVID y las han sustituido por modelos más eficientes, como los A320neos y los B737MAX, que ofrecen un ahorro de combustible del 15-20 % con respecto a las generaciones anteriores.

Las aerolíneas de la región tienen pedidos de más de 700 aeronaves, de los cuales casi el 80 % son aviones de fuselaje estrecho⁸. Estos pedidos respaldarán tanto las necesidades de crecimiento como las de sustitución; se espera que la próxima generación⁹ de aeronaves entre en servicio a partir de mediados de la década de 2030, liderada por turbohélices, seguidos por los *jets* (aviones de propulsión a chorro) regionales y los aviones de fuselaje estrecho hacia la segunda mitad de la década. Para 2050, las aeronaves nuevas y de futura generación dominarán la flota, lo que impulsará nuevas reducciones en el consumo de combustible por pasajero y kilómetro. Sin embargo, esto solo será posible si se cumplen los pedidos actuales y las aeronaves se entregan y se ponen en servicio a tiempo. Los retrasos en la cadena de suministro podrían ralentizar la adopción de estas nuevas aeronaves, incluso si las aerolíneas han invertido y se han comprometido a renovar su flota. La siguiente gráfica muestra el perfil de transición de la flota previsto en LAC, basado en la flota de línea base de 2024, los supuestos actuales y de edad de retiro, los supuestos de cartera de pedidos y entregas, y los aportes de los principales grupos de interés de LAC.

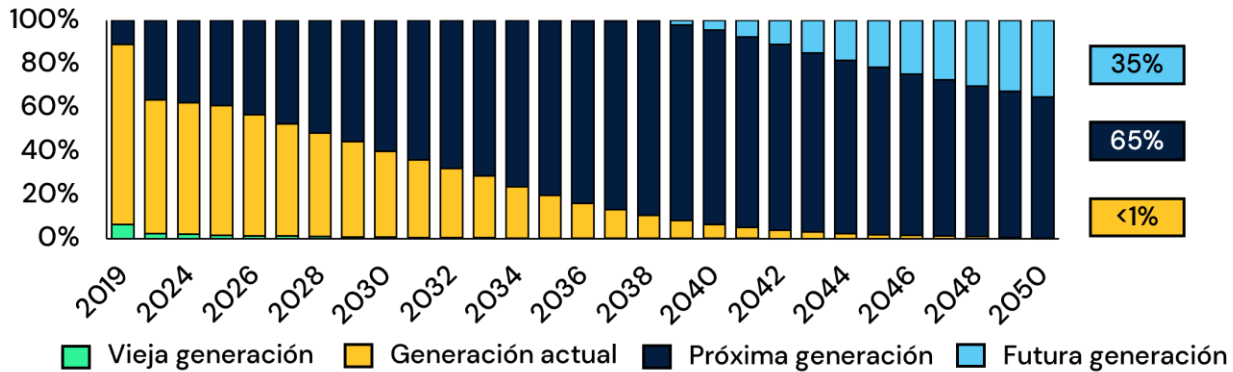
⁷ Informe LTAG.

⁸ Base de datos de flotas CAPA.

⁹ Generación que llega al mercado después de los NEO, MAX y la familia E-jets E2.

Las aerolíneas en LAC han empezado la transición hacia aeronaves más eficientes en consumo de combustible. Se espera que la futura generación entre en servicio a finales de la década de 2030

Composición de la flota por ASK



Fuente: análisis de ICF. ASK = asientos-kilómetro disponibles; las aeronaves de futura generación seguirán a la de NEO y MAX.

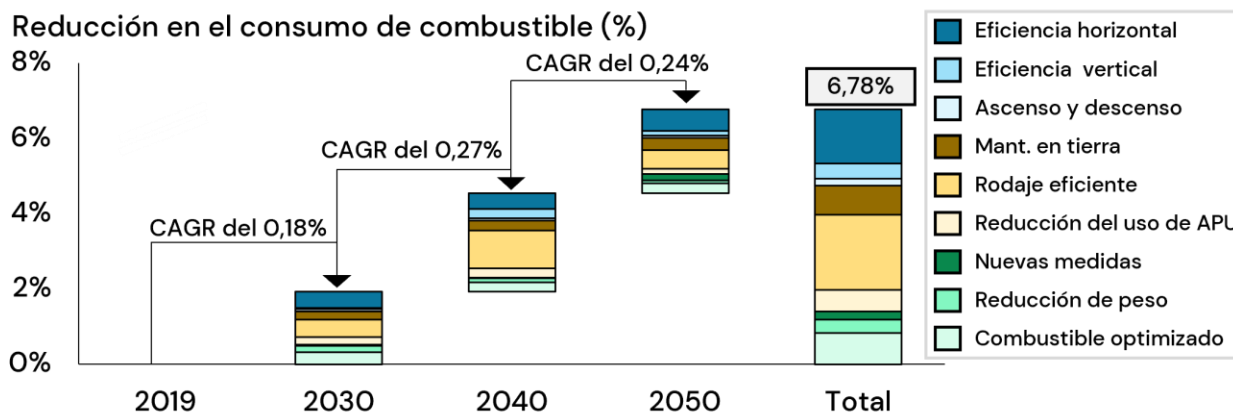
Estas tendencias destacan la importante inversión que las aerolíneas ya han realizado en la modernización de sus flotas y el papel fundamental del avance tecnológico continuo en el logro de los objetivos de reducción de emisiones a largo plazo.

La eficiencia operativa es una oportunidad esencial e inmediata

Respaldar una mayor eficiencia operativa es una medida inmediata y rentable. Las mejoras en las aeronaves, los aeropuertos, las operaciones en tierra y la optimización del perfil de vuelo ofrecen una oportunidad significativa para reducir el consumo de combustible y las emisiones en LAC, con un ahorro potencial de entre el 3,3 % y el 11,3 % para 2050. Estas medidas traen beneficios para todos ya que reducen las emisiones y los costos operativos, aumentan la resiliencia y mejoran el desempeño de todo el sistema.

Las aerolíneas de LAC ya han logrado avances significativos en la reducción de sus emisiones mediante mejoras en la eficiencia operativa. Sin embargo, para lograr aún más eficiencia, es necesaria una mayor participación del gobierno y los grupos de interés, la inversión de los aeropuertos y los proveedores de servicios de navegación aérea (ANSP), y la acción coordinada en todo el ecosistema de la aviación.

Las mejoras operativas en LAC podrían reducir el consumo de combustible de las aeronaves entre 3,3–11,3% en 2050, pero requieren mayor apoyo de grupos de interés adicionales

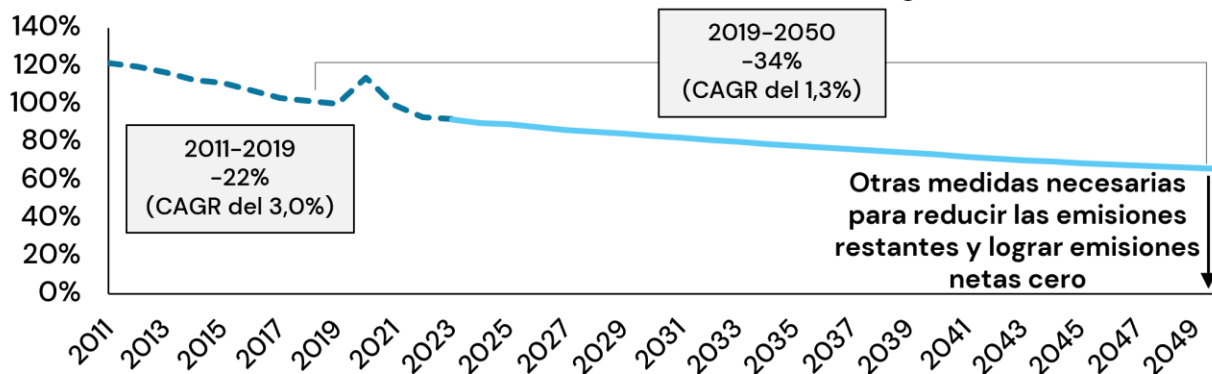


Según el escenario central, las medidas adicionales podrían reducir las emisiones de 2050 en un 6,8 %, aunque la mayor parte del ahorro depende de las medidas que adopten otros grupos de interés además de las aerolíneas. Las medidas en tierra representan la mayor oportunidad, con un potencial de ahorro de emisiones del 3,4 % mediante un mayor uso de unidades de energía terrestre fijas, aire preacondicionado, un mayor uso del rodaje con un solo motor y la adopción gradual de remolcadores eléctricos. Las medidas de eficiencia y planificación podrían generar un ahorro del 1,4 % para 2050 con respecto a 2019 mediante un uso más amplio de herramientas avanzadas de planificación del combustible, el monitoreo del desempeño y la optimización digital totalmente integrada del combustible. La optimización del perfil de vuelo podría generar un ahorro del 2,0 % gracias a rutas más directas, una mejor gestión del flujo y la adopción gradual de tecnología. El éxito en todas las medidas depende de la colaboración entre gobiernos, organismos reguladores, proveedores de servicios de navegación aérea, aerolíneas y aeropuertos, con el respaldo de la modernización, el entrenamiento y el intercambio transparente de datos.

La eficiencia operativa y de la flota es fundamental para reducir la intensidad de las emisiones, lo que permite lograr reducciones significativas e inmediatas en el consumo de combustible y los costos asociados, pero se necesita tomar medidas adicionales para abordar las emisiones residuales.

El impacto combinado de las eficiencias operativas y de la flota puede reducir la intensidad de las emisiones en un 34% entre 2019-2050

Cambio en la eficiencia del combustible comparado con 2019 (kg por RPK)



Fuente: datos históricos de ALTA - *Route to sustainability in Latin America and the Caribbean*, análisis de ICF.

Implementación de combustibles sostenibles de aviación (SAF) para lograr emisiones netas cero para 2050

Los SAF son una de las soluciones clave de reducción de emisiones a largo plazo de las que dispone el sector. En la línea base (crecimiento de la actividad sin medidas de reducción de emisiones), el consumo total de combustible de aviación (*jet fuel*) en LAC aumentará de 21,2 millones de toneladas (Mt) en 2019 a 44,5 Mt en 2050, lo que representa alrededor del 10 % del suministro global previsto¹⁰. Las aeronaves más eficientes y las mejoras en la eficiencia operativa reducen significativamente el consumo de combustible de aviación, en 13,4 Mt y 1,1 Mt respectivamente, lo que implica menores costos y emisiones. Sin embargo, incluso con estas medidas, se seguirían consumiendo 29 Mt de combustible de aviación en LAC, lo que produciría emisiones de alrededor de 111 Mt (WTW¹¹) de CO_{2e}. Los SAF, así como los créditos de carbono, son fundamentales para abordar estas emisiones restantes.

Los SAF ofrecen una ruta práctica para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero durante el ciclo de vida de la aviación, ya que pueden utilizarse como combustible de sustitución¹² con las aeronaves e infraestructuras existentes. Esta compatibilidad convierte a los SAF en una opción clave para reducir las emisiones de la aviación sin necesidad de realizar cambios importantes en las aeronaves o los sistemas aeroportuarios de combustible. Como resultado, muchas estrategias de reducción de emisiones de la aviación han considerado la adopción de SAF como una medida clave para reducir las emisiones de la aviación.

LAC se enfrenta a retos únicos que deben abordarse para desbloquear todo el potencial de SAF. Si bien cada uno de estos factores puede superarse o mitigarse, sugieren la necesidad de un mayor apoyo o una implementación más lenta en comparación con el promedio global. Los retos incluyen:

- **Capacidad limitada de los gobiernos para proporcionar apoyo financiero.** Menos fondos públicos disponibles para subvencionar el desarrollo de una industria regional de SAF. En LAC hace falta un apoyo a la escala del IRA en Estados Unidos o del STIP en la Unión Europea.
- **El costo del combustible es más elevado debido a las ineficiencias de la cadena de suministro.** El costo del combustible de aviación en la región es más elevado que en otras partes del mundo debido a la ineficiencia de las cadenas de suministro, al suministro monopolístico y con precios controlados en

¹⁰ Basado en el modelo de demanda de combustible de aviación utilizado en este estudio.

¹¹ WTW = Del pozo a la estela (*well-to-wake*)

¹² Combustible alternativo que puede utilizarse en motores e infraestructuras existentes sin necesidad de modificaciones.

algunos países, a la multiplicidad de regímenes fiscales que se solapan y a unas infraestructuras ineficientes y con escasa inversión, por lo cual ha llegado a representar entre el 30 % y el 40 %¹³ de los costos operativos de las aerolíneas regionales. Esto puede limitar los recursos disponibles para adoptar combustibles más costosos.

- **La industria de biocombustibles se enfoca en el transporte terrestre doméstico.** Debido a la química de producción de los biocombustibles, las instalaciones de SAF suelen coproducir otros biocombustibles, como nafta y diésel renovable, mientras que las instalaciones de diésel renovable pueden no producir ningún SAF. Además, la producción de diésel renovable suele ser más barata que la de SAF, ya que no se necesitan equipos de isomerización, se produce menos nafta de bajo valor y a que la industria ha tenido varias décadas para perfeccionar las tecnologías. Estos factores dan lugar a una programación de despliegue típica, la cual es liderada por el diésel renovable y el etanol, posteriormente, los SAF escalonarán sobre estas bases. Mientras que Brasil destaca por su industria de biocombustibles a gran escala, el uso de estos en el resto de LAC es mucho menor; el porcentaje de consumo de petróleo que se suple con biocombustibles es del 4,4 % en Estados Unidos y del 2,5 % en Europa, frente a solo el 1,6 % en LAC (excluyendo a Brasil)¹⁴. Además, los requisitos de sostenibilidad y certificación siguen siendo un factor clave para el despliegue de los biocombustibles. **Esto sugiere que una estrategia de biocombustibles podría enfocarse inicialmente en los combustibles para transporte por carretera, y que los SAF se desarrollarían posteriormente sobre esta base.**
- **Disponibilidad limitada de energía para la producción de hidrógeno verde.** El hidrógeno verde es un insumo clave para la producción de energía a líquido PtL (*power-to-liquid production*), pero su producción requiere un gran consumo de energía. Si bien países como Chile y Brasil tienen un gran potencial para el desarrollo del hidrógeno verde, existe competencia con otros usos energéticos nacionales. Además, se espera que el precio que pagan las aerolíneas por SAF de conversión de energía a líquido siga siendo significativamente más alto que el de otras rutas, incluso a medida que las tecnologías maduran.
- **La alta sensibilidad de los pasajeros al precio amplifica el impacto de la adopción de SAF.** Los SAF podrían tener un efecto importante en las estructuras de costos y en los precios de los tiquetes aéreos de las aerolíneas. Actualmente, los SAF son entre 3 y 12 veces más costosos que el combustible de aviación. Los pasajeros de LAC son muy sensibles a los precios, lo que aumenta el impacto de cualquier costo trasladado a los clientes. Como resultado, cualquier aumento en el precio de los tiquetes aéreos debido a la adopción de SAF podría reducir la demanda, y afectaría potencialmente la conectividad aérea en una región en la que la aviación desempeña un papel fundamental a la hora de conectar comunidades y apoyar el crecimiento económico.
- **Un entorno de inversión complejo.** La falta de una demanda financiable por parte de las aerolíneas nacionales que respalde el desarrollo de proyectos de SAF, sumada a la incertidumbre regional en materia de geopolítica, la inestabilidad política interna, la injerencia de otros gobiernos, el mayor costo de capital de los proyectos y la falta de tecnologías maduras de SAF o de mecanismos de financiación más allá de los incentivos a la producción, así como la elevada elasticidad de la demanda, son factores que se traducen en precios más elevados para los pasajeros y amenazan con afectar a la conectividad en mayor medida que en otras regiones.

Para evaluar los retos, se modeló el impacto de la alineación con la elevada mezcla de SAF del LTAG de la OACI. Esto supone una sustitución del 96 % de los combustibles fósiles con SAF, utilizando los mecanismos de carbono solo para las emisiones residuales. El elevado costo de SAF añadiría ~43 dólares (USD) por asiento embarcado para 2050 (30 600 millones de dólares anuales en todo el sector) y la sensibilidad de los pasajeros significan que el aumento del costo de los tiquetes aéreos provocaría una

¹³ En 2022, el combustible para aviación representó el 43% de los costos operativos, mientras que en el periodo 2022-2025 fluctuó entre 42% y 30%.

¹⁴ Sobre la base de la equivalencia energética del petróleo, fuente: *Statistical review of world energy*.

reducción de aproximadamente el 30 % en el tráfico aéreo y la conectividad en la región¹⁵. La reducción prevista de la demanda podría suponer una pérdida económica total para el sector de la aviación de unos 156 000 millones de dólares¹⁶, lo que afectaría significativamente a los pasajeros regionales, al sector de transporte aéreo, al turismo y al bienestar económico y social de la región en general.

Estos factores dan a entender que se requiere un enfoque estructurado y colaborativo para ampliar el uso de SAF en la región. Ninguno de estos factores es insuperable, sin embargo, las ambiciones deben respaldarse con una estrategia que refleje las circunstancias de cada país. Es importante destacar que estos retos también ofrecen oportunidades para la innovación y el liderazgo regional. LAC se beneficia de un abundante potencial de materias primas de segunda generación, lo que la posiciona como futura exportadora si se movilizan inversiones y asociaciones. Las medidas tempranas para aumentar la producción de biocombustibles para el transporte por carretera pueden sentar las bases técnicas y económicas para SAF, lo que permitiría una transición gradual y adecuada a cada región.

Se han anunciado más de 1900 millones de galones de capacidad de producción de SAF en LAC¹⁷, aunque ninguno de los proyectos anunciados ha superado aún la fase de decisión final de inversión (FID) y muy pocos cuentan con inversiones significativas en la fase de viabilidad. Esto indica un gran interés, asimismo, la industria regional tiene oportunidades significativas para producir y exportar SAF si se abordan los retos con esfuerzos coordinados para resolver las dificultades económicas, técnicas y de sostenibilidad. Una planificación cuidadosa y una comprensión de los posibles impactos asociados a la conectividad deben ocupar un lugar central en el diseño y la aplicación de políticas en los distintos países y en la región en su conjunto.

El papel de los créditos de carbono en la reducción de las emisiones de la aviación en LAC

Las medidas basadas en el mercado, incluidas la compensación y la eliminación de carbono, ofrecen una ruta crucial para lograr emisiones netas cero en la aviación de LAC. Estos mecanismos permiten a las aerolíneas compensar las emisiones residuales mediante la compra de créditos de carbono verificados de proyectos que reducen, evitan o eliminan gases de efecto invernadero fuera del sector de la aviación.

LAC desempeña un papel clave en el mercado del carbono. En los últimos cuatro años, la región emitió el 23 % de todos los créditos de carbono globales, lo que demuestra un papel desproporcionado en comparación con las emisiones regionales (6,7 % de las emisiones globales¹⁸ de carbono). Con ecosistemas naturales extensos y de importancia global, bosques tropicales y una rica biodiversidad, la región se encuentra en una posición única para liderar la generación de créditos de carbono de alta integridad, aunque la mayoría de las abundantes metodologías de las soluciones basadas en la naturaleza (NBS) están actualmente excluidas del CORSIA (*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*, Plan de Compensación y Reducción de Emisiones de Carbono para la Aviación Internacional). Hasta la fecha, los proyectos claves incluyen desarrollos a través de REDD+ (*Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation Plus*) y otros proyectos relacionados con la silvicultura. Guyana fue el primer país en obtener créditos autorizados por CORSIA (incluida la carta de autorización, LoA), lo que estableció un punto de referencia global para los programas jurisdiccionales de REDD+.

El mercado global voluntario de carbono ha aumentado significativamente, pasando de 56 Mt en 2016 a 251 Mt en 2024, lo que representa una CAGR¹⁹ de aproximadamente el 20 %. Para 2050, los analistas prevén que el mercado del carbono podría alcanzar entre 1800 y 8200 millones de toneladas (Mt) de CO₂ negociadas anualmente, incluidas las eliminaciones de la captura directa de aire (DAC)²⁰. Este estudio estima que el

¹⁵ Fuente de elasticidad utilizada: estimación de las elasticidades de la demanda de transporte aéreo en función del precio y los ingresos en América Latina (estudio realizado por la Universidad de San Andrés para respaldar este estudio).

¹⁶ Calculado prorrateando el valor de la aviación LAC calculado por ATAG: <https://aviationbenefits.org/>

¹⁷ Análisis de ICF de fuentes públicas.

¹⁸ OCDE, 2023.

¹⁹ $CAGR = ((\text{Valor final}/\text{Valor inicial})^{1/\text{Número de años}}) - 1$

²⁰ BloombergNEF, 2025, Green Earth, 2025.

mercado global alcanzará unos 4000 millones de toneladas métricas en 2050, con un crecimiento anual de alrededor del 11 %, y que LAC podría representar alrededor de 1000 millones de toneladas métricas de ese total. En cuanto a la aviación, se espera que el número de créditos de alta calidad disponibles en LAC sea de alrededor de 100 millones a mediados de siglo.

La solidez del mercado y los cobeneficios son esenciales. El mercado global ha sido objeto de un intenso escrutinio en los últimos años, lo que ha impulsado un renovado interés por la calidad, la precisión y los cobeneficios para las poblaciones locales. Esto debería impulsar nuevas mejoras en la madurez y el impacto del mercado. Muchas aerolíneas en LAC se benefician además de su proximidad y comprensión de los ecosistemas, las comunidades y los proyectos que desarrollan créditos de carbono en la región, lo que permite un mayor nivel de rigor y alineación de los beneficios.

Para aprovechar el potencial de los mercados de carbono en la región será necesario optimizar los procesos de cartas de autorización (LoA) para los programas internacionales, reforzar los sistemas de monitoreo, reporte y verificación (MRV) y fomentar la colaboración regional con el fin de armonizar los estándares y reducir la fragmentación. Los incentivos financieros, tales como los créditos fiscales y los bonos verdes, pueden ayudar a movilizar la inversión en proyectos de alta calidad. **A medida que aumenta la demanda de créditos elegibles para la aviación, LAC está bien posicionada para satisfacer las necesidades regionales y globales si se abordan las principales barreras regulatorias e institucionales.**

Equilibrar el uso de SAF y los créditos de carbono teniendo en cuenta el precio y la disponibilidad

La combinación de SAF y los créditos de carbono debe ser adecuada a los recursos de cada país. Ambos enfoques pueden ser sólidos desde el punto de vista medioambiental si se cuenta con las salvaguardias adecuadas, y siempre será necesaria una combinación de ambos mecanismos para lograr los objetivos globales de la aviación. Son múltiples los factores que determinan la estrategia ideal para reducir las emisiones de la aviación, entre ellos la disponibilidad de infraestructuras, los conocimientos técnicos, la disponibilidad de materias primas para SAF y el potencial de inversión, las oportunidades de compensación y remoción y la solidez de sus cobeneficios, la capacidad y la disposición de los pasajeros de pagar, y los recursos de los gobiernos para incentivar el desarrollo de nuevas industrias como la de SAF.

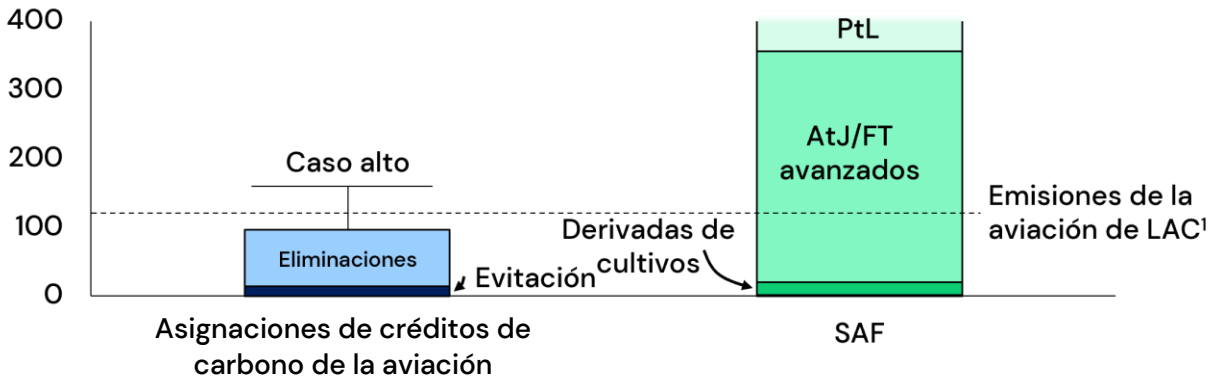
La disponibilidad de mecanismos es un factor clave para tener en cuenta. En 2024, SAF representaba menos del 1 % del consumo global de combustible de aviación²¹. Múltiples estudios han destacado la disponibilidad global de materia prima, y esta evaluación identificó el potencial de materia prima en LAC. Sin embargo, casi todos estos volúmenes de materia prima requieren tecnologías avanzadas (como la producción de etanol celulósico, alcohol para aviones, Fischer-Tropsch) que aún no se han implementado a escala comercial. La disponibilidad de materias primas para el proceso y el coprocesamiento probado de HEFA es limitada, y existe una fuerte competencia por su uso como biocombustible no destinado a la aviación y en otros sectores. El mercado del carbono también es relativamente pequeño hoy en día en comparación con las emisiones globales. En 2025, se generaron 251 Mt de créditos en todos los sectores, lo que equivale a menos de una cuarta parte de las emisiones globales de la aviación y solo al 0,7 % del total de las emisiones globales. El aumento del desarrollo y el uso de créditos de carbono permite incrementar significativamente la escala, pero es necesario respaldar el mercado para que los inversionistas tengan confianza a la hora de invertir y para garantizar la solidez y la durabilidad de las reducciones subyacentes. La siguiente gráfica ilustra el pronóstico de disponibilidad para 2050 en LAC, en comparación con las emisiones de la aviación.

Esto lleva a dos conclusiones: es necesaria una combinación de mecanismos y LAC puede tener una oportunidad como exportadora de SAF a países donde la demanda supera la disponibilidad de materia prima.

²¹ <https://www.iata.org/en/pressroom/2024-releases/2024-12-10-03>

Disponibilidad prevista de créditos de carbono y SAF en 2050, en términos de reducción de CO₂e

Reducción disponible, millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente (mtCO₂e)

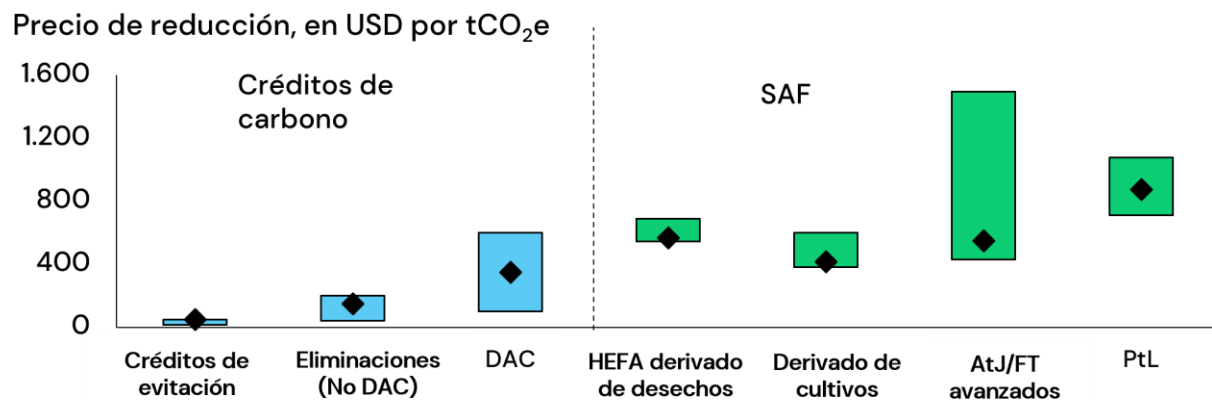


Fuente: análisis de ICF.

Nota: (1) Después de mejoras operativas y de la flota.

Comparación del costo de abatimiento para SAF y los créditos de carbono en 2050. El pronóstico del precio de los créditos de carbono está impulsado principalmente por la oferta y la demanda, mientras que el precio de SAF depende de factores tecnológicos. Como resultado, el análisis asume un aumento gradual del precio de los créditos de carbono sólidos a medida que la demanda supera la oferta, pero una disminución gradual del precio de SAF a medida que las tecnologías maduran y el mercado crece. Sin embargo, hay que tener en cuenta que las materias primas para los combustibles alternativos son productos básicos con sus propios mercados y, como tales, tienen un precio mínimo. Hay algunas excepciones para rutas individuales, por ejemplo, con el progreso tecnológico que disminuye el costo de abatimiento de la DAC de ~1300 USD/tCO₂e en la actualidad a entre 100 y 600 USD/tCO₂e para 2050²², y el suministro limitado de aceites usados (como el de cocina usado y el sebo) que aumenta el costo del proceso HEFA basado en aceites usados con el tiempo.

Costo de reducción de rutas seleccionadas de créditos de carbono y SAF en LAC en 2050



Fuente: análisis de ICF.

Nota: el precio de reducción de SAF está basado en la prima de SAF.

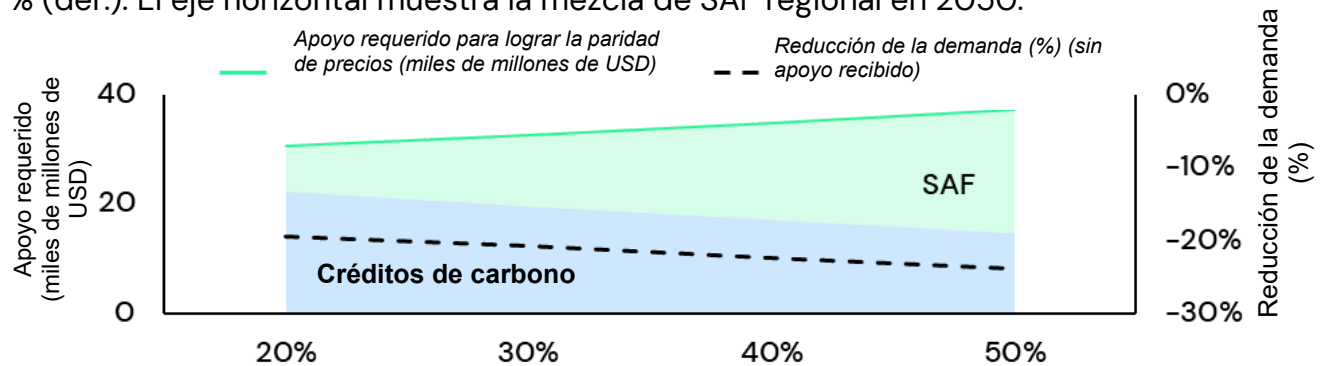
²² Elhardt, 2024; Young et al., 2023.

La combinación de créditos de carbono y SAF tiene un impacto significativo en la magnitud del apoyo necesario

El impacto en los costos varía significativamente en función de la combinación de créditos de carbono y SAF. Este estudio ha evaluado el impacto en la demanda y la subsecuente pérdida de valor económico para una gama de mezclas regionales de SAF, que van desde el 20 % hasta el 100 %. También se ha calculado el nivel de apoyo a los precios para mitigar la reducción de la demanda de transporte aéreo. Esto muestra que, para una mezcla de SAF al 20 % en 2050, la demanda de aviación se reduciría en un 19,5 %, lo que equivale a una reducción de 111 000 millones de dólares en valor económico potencial. 30 500 millones de dólares en apoyo gubernamental en 2050, y 224 000 millones de dólares en total, mitigarían este impacto en los precios y la demanda. En comparación, una mezcla de SAF al 50 % reduciría la demanda en un 24 %, logrando un impacto económico de 131 000 millones de dólares, lo que requeriría 37 300 millones de dólares de ayuda para mitigar el impacto en 2050 y 284 000 millones de dólares en total.

Nivel de apoyo de los gobiernos e inversiones requeridos y reducción de la demanda para la combinación de mecanismos de SAF y carbono en 2050

Apoyo requerido en miles de millones de USD (izq.) y reducción de la demanda en % (der.). El eje horizontal muestra la mezcla de SAF regional en 2050.



Fuente: Análisis de ICF

Tabla1: Volumen, costo e impacto en la demanda de créditos de carbono y SAF en 2050

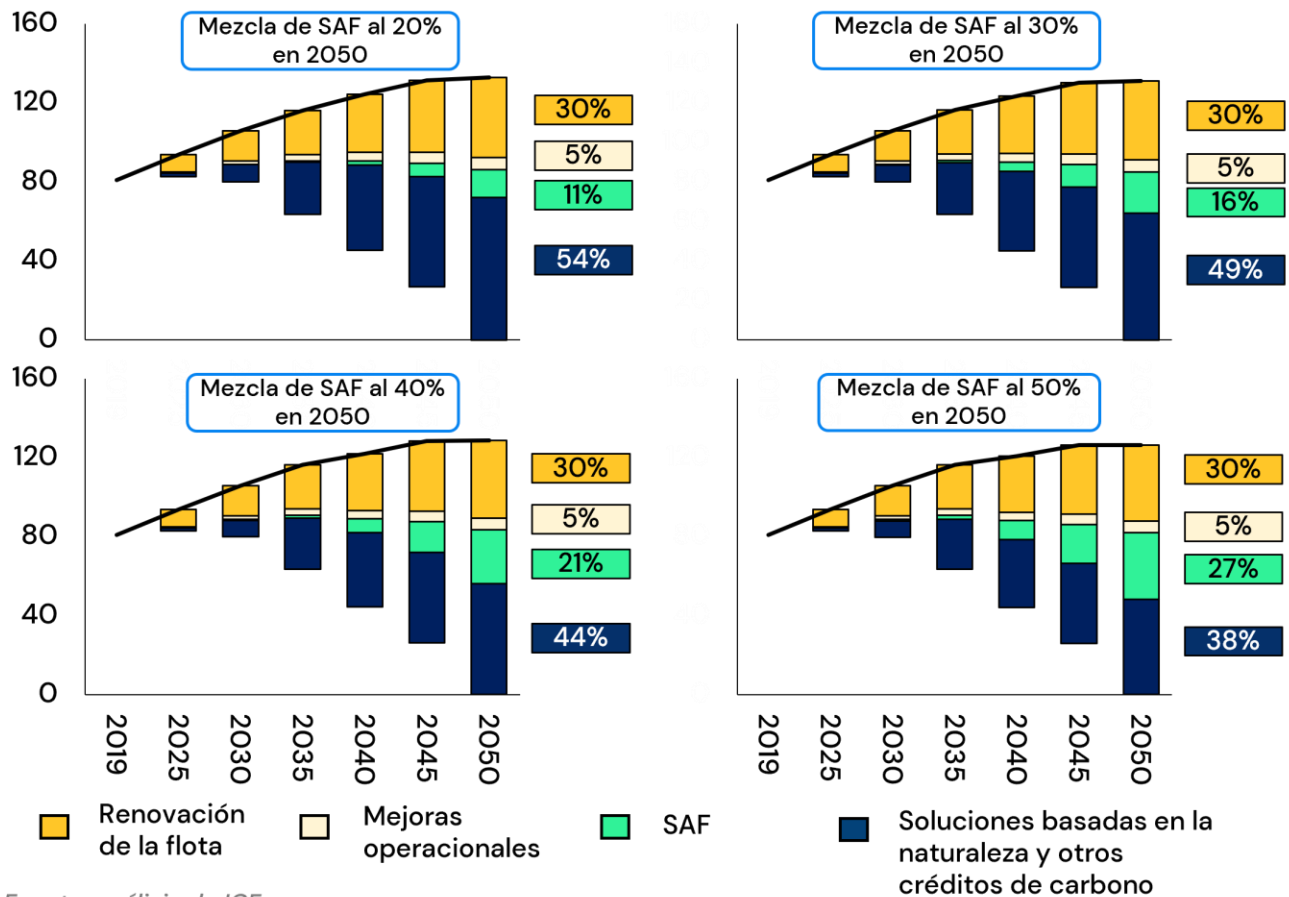
Mezcla de SAF (2050)	20%	30%	40%	50%
Créditos de carbono requeridos (Mt CO ₂ /año)	92,4	83,4	74,1	64,9
Costo de los créditos de carbono (miles de millones de dólares al año)	22,2	19,7	17,2	14,6
Costo de la prima de SAF (miles de millones de dólares al año)	8,3	12,9	17,8	22,7
Costo total (miles de millones de dólares al año)	30,5	32,6	34,9	37,3
Impacto en la reducción de la demanda (%/año) ²³	-19,5	-20,7	-22,4	-24,0

Con base en las rutas hacia la reducción de emisiones, con una mezcla de SAF al 20-50 % para 2050, la siguiente figura ilustra cómo se puede lograr el objetivo de emisiones netas cero combinando renovaciones de flota, mejoras en la eficiencia operativa, adopción de SAF y créditos de carbono.

²³ Medido en reducción de asientos de salida. Nota esto muestra un caso extremo en el que el impacto total de los costos se traslada en su totalidad a los pasajeros.

Rutas ilustrativas de descarbonización en el sector de la aviación de LAC para lograr emisiones netas cero para 2050

Millones de toneladas de CO_{2e}



Fuente: análisis de ICF.

Nota: la línea base incluye la reducción de la demanda.

La colaboración entre los grupos de interés de la industria, las jurisdicciones y los sectores, junto con el apoyo de los gobiernos, es la única forma de alcanzar el objetivo de emisiones netas cero y, al mismo tiempo, permitir que la aviación crezca y siga ofreciendo los beneficios sociales y económicos asociados.

Este informe evalúa las implicaciones de que las aerolíneas de LAC lleguen al objetivo de emisiones netas cero para 2050, y concluye que las medidas inmediatas (eficiencia de la flota y de las operaciones) pueden reducir significativamente las emisiones. Sin embargo, abordar las emisiones residuales requiere de una estrategia cuidadosa y un apoyo focalizado debido a la compensación entre garantizar la conectividad de la región y la adopción de estrategias de reducción de emisiones más costosas, como SAF. Cualquier aumento rápido en el uso de SAF no subsidiado y de créditos de carbono incrementaría considerablemente el costo para los pasajeros, lo que provocaría una reducción de la demanda que limitaría injustamente el crecimiento y la conectividad de la aviación en comparación con los países desarrollados, lo que tendría un impacto directo en el desarrollo económico regional. Esto se traduciría en decenas de miles de millones de dólares de valor económico perdido para 2050 (incluyendo el directo, indirecto, inducido y turístico)²⁴. La aviación es un componente vital para LAC, ya que facilita las conexiones entre regiones y familias, permite el transporte de mercancías y respalda la industria turística y el desarrollo económico en general. Esto se debe principalmente a las grandes distancias, la complejidad geográfica y la falta de infraestructuras de transporte alternativas en la región.

²⁴ Basado en el valor añadido de la aviación en 2023 en toda la región y normalizado por los asientos-kilómetro disponibles (ASK) previstos: Aviation: Benefits Beyond Borders.

Para hacer frente a los costos de la reducción de emisiones, los gobiernos deben aplicar incentivos económicos y regulatorios concretos que impulsen la eficiencia, la innovación y la competitividad en toda la cadena de valor de la aviación: desde los productores de combustibles sostenibles para la aviación hasta las compañías aéreas. Los paquetes de políticas pueden permitir a las aerolíneas acelerar la reducción de emisiones mediante la combinación de medidas focalizadas, como alivios tributarios por la compra de SAF, descuentos o reintegros en cobros aeroportuarios y de navegación aérea vinculadas al uso de SAF, y regímenes fiscales diferenciados que recompensen la adopción verificada de SAF. Dado el costo relativo del combustible de aviación (aproximadamente el 40 % de los costos operativos) y el precio de SAF (entre 3 y 12 veces superior al del combustible de aviación), será necesario adoptar múltiples medidas combinadas que aborden la enorme diferencia de precios. Se necesitarán contribuciones de países desarrollados y organizaciones multilaterales, así como la implementación de soluciones técnicas como subastas dobles o mecanismos de certeza de ingresos, que han demostrado ser útiles para impulsar otras industrias de energías renovables, como la del hidrógeno. Un elemento significativo de este apoyo podría venir de gobiernos extranjeros, ya sea de manera indirecta (por ejemplo, gobiernos de países desarrollados que financian la I+D para nuevas tecnologías de producción de SAF) o directa (por ejemplo, apoyando el desarrollo de proyectos de créditos de carbono y la producción de SAF en LAC mediante la provisión de mercados de exportación, o a través de inversiones directas y nuevos mecanismos de financiación climática). Dentro de la región, las intervenciones gubernamentales también deberían incluir procesos regulatorios optimizados y marcos de trabajo colaborativos que fomenten la inversión en tecnologías más limpias.

Además, la participación de múltiples grupos de interés puede ayudar a equilibrar los objetivos climáticos con las prioridades económicas, garantizando que la industria de la aviación permanezca resiliente mientras avanza hacia los objetivos de emisiones netas cero. La alineación regulatoria en toda LAC es un requisito fundamental para avanzar en la reducción de emisiones en sector de la aviación. Las regulaciones en armonía facilitarán la aplicación efectiva de diversas medidas necesarias para apoyar la transición del sector hacia unas emisiones más bajas. Sobre esta base, las siguientes prioridades estratégicas describen las áreas claves en las que la acción coordinada y el apoyo focalizado serán esenciales para permitir la transición de la industria hacia unas emisiones más bajas.

- **Apoyar la renovación de flota:** La modernización de flota es el pilar fundamental para alcanzar el objetivo de emisiones netas cero, dado su importante impacto tanto en los costos de combustible como en las emisiones. Las aerolíneas ya han invertido miles de millones en nuevas aeronaves, y dicha inversión continua en aeronaves de última generación y las tecnologías de propulsión futuras impulsarán reducciones continuas en el consumo de combustible por pasajero-kilómetro. El apoyo focalizado de los gobiernos y las instituciones financieras, incluida la amortización acelerada y la financiación preferencial, contribuye a sostener la inversión de las aerolíneas.
- **Acelerar las ganancias de eficiencia operativa:** Las mejoras en la eficiencia operativa ofrecen una forma inmediata y rentable de reducir las emisiones, a menudo con cobeneficios para la duración de los desplazamientos y la calidad del aire local en los aeropuertos. Ya se han implementado muchas medidas dentro del control de las aerolíneas, incluidas iniciativas de reducción de peso y programas de entrenamiento para fomentar el rodaje con un solo motor; se esperan más ganancias gracias a la acción coordinada con los gobiernos, los aeropuertos y los ANSP.
- **Habilitar el escalonamiento de SAF mediante un enfoque gradual:** Los SAF son una medida necesaria para la reducción de emisiones a largo plazo, pero los altos costos y las limitaciones de infraestructura implican que los objetivos regionales deben reflejar las realidades locales. Una estrategia por fases debería comenzar por comprender las compensaciones y alinear las necesidades de la economía en su conjunto, fortalecer el sector de los combustibles renovables para el transporte terrestre y evaluar el potencial de cada país para acceder a mercados de exportación adecuados para el, con el fin de alcanzar la escala necesaria y la sostenibilidad a largo plazo del mercado de SAF, así como diseñar políticas que respalden la creación de una demanda doméstica bancable, con un enfoque en el apoyo al pasajero para la adopción del SAF. Los gobiernos, las aerolíneas y la industria deben trabajar de manera coordinada para atraer inversión, optimizar permisos y desarrollar cadenas de suministro regionales sin dejar de garantizar la protección de la conectividad y del desarrollo económico a nivel sistémico. Es necesario adoptar un

enfoque regulatorio unificado y cooperativo para promover el desarrollo de SAF, garantizando volúmenes de producción suficientes, precios competitivos y la certificación bajo CORSIA, lo que incluye estándares armonizados y procesos transfronterizos optimizados para la distribución de materias primas y combustibles. Paralelamente, será importante habilitar la comercialización de los atributos medioambientales, como los sistemas *book-and-claim*, para ayudar a compensar los costos y garantizar un mercado de exportación para SAF de LAC.

- **Fortalecimiento y promoción de la interoperabilidad del mercado de créditos de carbono:** LAC tiene un potencial considerable para aumentar su mercado de créditos de carbono, al tiempo que ofrece importantes cobeneficios en términos de naturaleza, agua y biodiversidad, y apoya la reducción de emisiones de otras industrias, como la agricultura, que representan una gran proporción de las emisiones en la región. Los gobiernos y los grupos de interés deben colaborar para establecer reglas transparentes, metodologías estandarizadas y marcos de trabajo MRV confiables. Esto incluye aclarar los derechos de propiedad del carbono, facilitar la emisión y transferencia de créditos, y garantizar la compatibilidad con los estándares internacionales para atraer la demanda tanto regional como global. Además de reducir las emisiones, un mercado eficaz de créditos de carbono puede generar importantes cobeneficios para la conservación y la biodiversidad, ya que incentiva la preservación y restauración de bosques, humedales y otros ecosistemas críticos, la protección de especies en peligro de extinción y la promoción de prácticas sostenibles de uso de la tierra que mejoran los servicios ecosistémicos y fortalezcan la resiliencia climática en toda la región, al tiempo que aporta beneficios sociales mediante la creación de empleo en el medio rural, la mejora del sustento de las comunidades locales y el desarrollo comunitario.
- **Facilitar el intercambio continuo de conocimientos:** Es fundamental que todos los grupos de interés, incluidas las aerolíneas, los organismos gubernamentales, los socios industriales y los organismos reguladores, trabajen de manera colaborativa para atender limitaciones, compartir conocimientos técnicos y perspectivas de políticas. Al mantener canales de comunicación transparentes y continuos, los grupos de interés pueden identificar y abordar las ineficiencias, implementar soluciones comprobadas y evitar la duplicación de esfuerzos.

Al dar prioridad a la acción coordinada y a las políticas de apoyo, LAC puede crear un entorno que promueva la inversión, impulse la innovación y elimine las barreras para la implementación. Para lograr el objetivo de emisiones netas cero se necesitará un compromiso sostenido, una responsabilidad compartida y un enfoque equilibrado que alinee los objetivos climáticos con las prioridades económicas y sociales.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen ejecutivo	3
1 Introducción	18
1.1 Introducción	19
1.2 El contexto global	19
1.3 El contexto de América Latina y el Caribe	20
1.4 Evaluación del trabajo existente.....	22
2 Actividad de vuelo en LAC.....	36
2.1 Actividad del transporte aéreo en LAC	37
2.2 Metodología, fuentes de datos y supuestos	37
2.3 Perspectivas económicas para LAC	44
2.4 Actividad regional total	44
2.5 Pronósticos a nivel de país	48
3 El papel de la renovación de flota	60
3.1 Modernización y reemplazo de flota.....	61
4 Mejoras operacionales y pronóstico de emisiones.....	70
4.1 Introducción	71
4.2 Alcance y metodología	74
4.3 Medidas de eficiencia y planificación de aeronaves	75
4.4 Operaciones aeroportuarias y terrestres	78
4.5 Optimización del perfil de vuelo.....	85
4.6 Resultados y discusión.....	96
4.7 Pronóstico de línea base de combustible de aviación	98
5 Evaluación de oportunidades y obstáculos	101
para SAF en Latinoamérica y el Caribe	101
5.1 Oportunidades y retos para SAF en LAC	102
5.2 Marcos de trabajo de políticas de SAF a nivel global: OACI y el CORSIA	103
5.3 Industria y políticas de SAF en LAC.....	107
5.4 Infraestructura energética e implicaciones para la producción de SAF	114
5.5 La sostenibilidad y el mercado global de SAF.....	116
5.6 Disponibilidad de materias primas biogénicas para la producción de SAF	119
5.7 Metodología de cálculo de precios de SAF y supuestos de los pronósticos.....	136
6 Oportunidades para compensaciones y eliminaciones en LAC	160
6.1 Oportunidad para medidas basadas en el mercado.....	161
6.2 Mercado global de compensaciones de carbono	162
6.3 Previsiones de precios y volumen.....	164
6.4 Créditos de carbono en LAC.....	169

6.5	Estrategia y recomendaciones.....	173
7	¿Por qué es necesario un enfoque regional para LAC?	175
7.1	Alcance y metodología	176
7.2	Puntos de referencia globales	177
7.3	Escenarios para LAC.....	179
8	Declaración final	188
	Apéndice.....	192
	Apéndice A: El papel del coprocesamiento	192
	Apéndice B: Panorama de la electricidad renovable y potencial para el PtL en la región	194
	Apéndice C: Análisis de elasticidad.....	196

1 Introducción



1.1 Introducción

Este proyecto explora la ruta y el papel de la aviación en América Latina y el Caribe para reducir las emisiones sin perder la conectividad. La aviación se ha comprometido a alcanzar emisiones netas cero para 2050, y varios análisis globales, incluido el LTAG de la OACI, proporcionan un marco de trabajo general para lograrlo. Sin embargo, la ruta, el mecanismo y la función de cada región deben adaptarse a los recursos y retos de cada país. La diversidad de las naciones de América Latina y el Caribe hace que sea especialmente importante adaptar la ruta regional. El objetivo de este proyecto es poner de relieve los retos y las oportunidades que plantean las rutas hacia las emisiones netas cero, así como establecer un punto de partida para trazar rutas de aviación adaptadas a la región.

1.2 El contexto global

La industria aeronáutica está experimentando una rápida transformación para reducir su huella de carbono. En 2022, la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) estableció el LTAG de alcanzar emisiones netas cero para 2050²⁵. El LTAG representa un compromiso colectivo de los Estados miembros de la OACI para lograr emisiones netas cero en la aviación internacional, en concordancia con el objetivo más amplio del Acuerdo de París de la CMNUCC de limitar el aumento de la temperatura media global. El LTAG es un objetivo no vinculante jurídicamente que no impone objetivos específicos a los distintos países, sino que reconoce que cada Estado tiene capacidades y circunstancias propias, tales como diferentes niveles de desarrollo, madurez del mercado y prioridades nacionales.

El LTAG se formó basándose en un enfoque de escenarios, con el fin de determinar las posibles trayectorias en función de un nivel alto, medio y bajo de preparación, capacidad de logro y aspiración. El análisis LTAG incluye subconjuntos de escenarios para tecnología, combustible y operaciones. Debido a los retos que plantea la reducción de las emisiones de la aviación, a pesar de la ambición, ninguno de los escenarios alcanza el objetivo de emisiones netas cero sin medidas fuera del sector, reconociendo también el papel clave de los créditos de carbono para lograr el objetivo de emisiones netas cero. Cada escenario incluye también un nivel definido de dichas medidas.

Reconociendo la relevancia y el alto nivel de trabajo experto que respalda el estudio de viabilidad de LTAG, este estudio refleja la metodología de desarrollo de escenarios de LTAG, ya que proporciona un estándar reconocido por la industria para desarrollar rutas hacia la reducción de emisiones.

En este contexto, los países están estableciendo cada vez más planes de reducción de emisiones para la aviación con el fin de cumplir el LTAG, normalmente como parte de estrategias de descarbonización más amplias. Mediante el uso de esta metodología y el desarrollo de escenarios para LAC, este estudio contribuye al debate más amplio sobre la reducción de emisiones de la aviación y ofrece un ejemplo sólido sobre el establecimiento de políticas nacionales / regionales y estrategias de la industria en consonancia con el concepto de responsabilidad común pero diferenciada de la CMNUCC.

²⁵ <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/LTAG.aspx>

1.3 El contexto de América Latina y el Caribe

La aviación desempeña un papel fundamental en LAC, ya que contribuye con el 3,6 % del PIB regional (equivalente a 240 000 millones de dólares) y genera entre 7 y 8 millones de puestos de trabajo (el 2,9 % del empleo)²⁶. Dada la extensa geografía de la región y la limitada infraestructura terrestre, el transporte aéreo es esencial para la conectividad y sigue siendo irremplazable debido a la falta de alternativas, especialmente en zonas remotas, ya que facilita el acceso a servicios como la sanidad y la educación. Además, actúa como agente de desarrollo económico.

A pesar de ello, el transporte aéreo sigue estando infrutilizado en la región, con solo 0,5 viajes per cápita al año, frente a más de dos en Estados Unidos y Europa. La demanda está creciendo rápidamente: el número de pasajeros se ha multiplicado por 18 desde 1970 y ha llegado a los 324 millones en 2023, el 40 % de ese crecimiento tuvo lugar en la última década. Se prevé que este tráfico siga creciendo, con un aumento anual de las tasas de pasajeros domésticos de entre el 2,7 % y el 4,3 % entre 2027 y 2043.²⁶ Las rutas internacionales hacia y desde estas dos regiones están experimentando el mayor crecimiento, y se espera que África, Oriente Medio, India, China y otras partes de Asia registren un crecimiento sustancial. La Declaración de Lima, emitida en 2023 por los ministerios y las autoridades aeronáuticas de la Comisión Latinoamericana de Aviación Civil (CLAC), tiene como objetivo aumentar el tráfico aéreo en un 50 % entre 2023 y 2033.²⁷

Este crecimiento, aunque en general positivo desde el punto de vista económico y social, también plantea retos medioambientales. La región representó el 4,8 % de las emisiones globales de CO₂ de la aviación entre 2013 y 2023, México y Brasil son los dos países con mayores emisiones²⁸. Se espera que las emisiones de la aviación aumenten un 0,9 % anual hasta 2050 si no se adoptan esfuerzos de reducción²⁹. Por lo tanto, a pesar de las continuas ganancias en materia de eficiencia energética y operativa, y aunque se reconoce que sigue habiendo un alcance significativo en todo el ecosistema de la aviación para mejorar aún más la eficiencia de todo el sistema, lograr el objetivo de emisiones netas cero requerirá una inversión importante en todos los niveles del entorno de la aviación. Estos costos adicionales aumentarán el precio de los tiquetes aéreos y limitarán el acceso a los viajeros con menos ingresos o sensibles al precio, sobre todo teniendo en cuenta que SAF puede ser entre 3 y 12 veces más caro que el combustible convencional para aviones, que ya representa entre el 35 % y el 40 % de los costos operativos de las aerolíneas. Teniendo en cuenta también la capacidad de apoyo de los gobiernos y la disposición a pagar de los particulares y las empresas, las disparidades económicas plantean retos adicionales para las iniciativas de reducción de emisiones. Por ejemplo, en 2024 el PIB per cápita de la región fue de 11 045 dólares, frente a los 43 145 dólares de Europa y los 85 810 dólares de Estados Unidos³⁰.

Los países de América Latina, Centroamérica y el Caribe han respaldado el LTAG y otros acuerdos que promueven el uso de combustibles alternativos (por ejemplo, el acuerdo alcanzado en la ICAO CAAF/3)³¹. Como prueba de este respaldo, LAC ha colaborado activamente con el LTAG mediante esfuerzos de construcción de capacidades, con ejemplos tanto de la Cooperación entre la UE y América Latina en materia

²⁶ <https://alta.aero/wp-content/uploads/2025/01/Route-to-Sustainability-in-LATAM-and-Caribbean.pdf>

²⁷ Lima Declaration https://clac-lacac.org/wp-content/uploads/2023/12/RE-AsaExt7_NE02_engRev.pdf

²⁸ La aviación representa alrededor del 2 % de las emisiones globales; Fuente: https://atag.org/media/gw5cgzsh/fact-sheet_2_aviation-and-climate-change.pdf

²⁹ Waypoint2050 <https://atag.org/resources/waypoint-2050-2nd-edition-september-2021/>

³⁰ <http://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD>

³¹ <https://atag.org/news/agreement-reached-on-aviation-clean-energy/>

de aviación civil (EU-LAC) como de las oficinas regionales de la OACI en Suramérica (SAM) y Norteamérica (NACC). **Es fundamental que los países de América Latina y el Caribe adopten un enfoque de reducción de emisiones adecuado y alineado a nivel regional para garantizar coherencia y uniformidad en toda la región, pero con enfoques razonablemente diferenciados que se adapten a las necesidades y realidades de cada país de la región. En particular, se debe evitar la implementación de mandatos de SAF debido al impacto esperado en la conectividad. Esto crearía un mercado más unificado, lo cual agilizaría el desarrollo de infraestructuras, crearía vínculos cruciales para la investigación y la innovación, y agruparía recursos para atraer potencialmente inversiones más cuantiosas. Las oportunidades que ofrece un enfoque unificado también incluyen la posibilidad de crear un *hub* de SAF en la región. Garantizar las regulaciones en armonía entre los países de la región y a nivel global facilitará el comercio de SAF y de materias primas claves incluso a través de las fronteras o, lo que es más importante, facilitará su adopción por parte de las aerolíneas, independientemente de sus rutas o base. Esto permitirá a la región aprovechar la abundancia de materias primas en algunos países, en sinergia con la infraestructura necesaria, o incluso la demanda, en otros.**

Los países de LAC también cuentan con un conjunto de herramientas únicas para reducir las emisiones. Las NBS, como la reforestación, pueden capturar hasta dos gigatoneladas de CO₂ al año para 2050, especialmente teniendo en cuenta el papel de la Amazonía en la absorción de casi una cuarta parte del carbono forestal global y el hecho de que la agricultura, los bosques y el uso de la tierra representan la mayor parte de las emisiones de la región³². El uso de las NBS y de los créditos de carbono es una situación beneficiosa para todos, ya que apoya la protección vital de la biodiversidad, reduce los pasivos medioambientales y mejora el capital natural de los países. La inclusión de las NBS y los créditos de carbono en la reducción de emisiones de la aviación demuestra una firme intención de sostenibilidad y ofrece un potencial significativo para que el sector contribuya a proteger y regenerar ecosistemas críticos en la región, pero su exclusión de los escenarios básicos del LTAG de la OACI, debido al enfoque en medidas internas de reducción de emisiones en contraposición a medidas fuera del sector, limita su uso actual. Al mismo tiempo, las metodologías de las NBS más destacadas en la región, como REDD+, entre otras, también están muy limitadas o excluidas del CORSIA, lo que dificulta aún más la capacidad de la región para contribuir tanto a la protección de sus ecosistemas como a los planes internacionales de aviación con sus soluciones de alto potencial.

1.3.1 CORSIA

Los vuelos entre los Estados participantes cuentan para los requisitos de compensación del CORSIA. Los vuelos que involucran a países no participantes están excluidos de las obligaciones del CORSIA, excepto en lo que respecta al monitoreo y la presentación de reportes, que abarca todos los vuelos internacionales. La situación regional se describe en el mapa a continuación. Solo Brasil y México están obligados por CORSIA debido a su tráfico aéreo (RTK internacional en 2018³³), y México ya participa en la fase voluntaria. Aunque no están obligados a ello, otros 16 Estados de la región están participando en la fase voluntaria y se asume que

³² <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aax0848> ; <https://sigmaearth.com/how-reforestation-helps-reduce-carbon-emissions/> ; <https://publications.iadb.org/en/benefits-and-costs-reaching-net-zero-emissions-latin-america-and-caribbean>

³³ [International-RTK-rankings_2018_SIDS_LDC_LLDC.pdf](#)

continuarán más allá de esta³⁴. Guyana se ha convertido en pionera al autorizar un total de 7,14 millones de créditos aptos para su uso por parte de las aerolíneas en la Fase 1 del CORSIA³⁵.

Países participantes del CORSIA en LAC



Fuente: OACI.

Nota: Asume que los países que optaron por participar en la fase voluntaria, que inició en 2023, continuarán en la fase obligatoria que inicia en 2027.

1.4 Evaluación del trabajo existente

A medida que la región ha intensificado sus esfuerzos de reducción de emisiones en consonancia con el LTAG, nueve de los once países evaluados en este estudio han publicado un plan de acción estatal para la aviación. Las siguientes secciones analizan el contexto de la aviación en cada uno de los once países dentro del alcance del estudio. Se presenta el PIB total y el número de puestos de trabajo creados a través de la aviación para cada uno, con base en el beneficio total de la aviación, tanto directamente como a través de la cadena de suministro más amplia, el gasto de los empleados y las actividades turísticas.

³⁴ https://www.icao.int/sites/default/files/2025-06/CORSIA-States-for-Chapter-3-State-Pairs_5Ed_Rev_web.pdf

³⁵ <https://lcds.gov.gy/guyana-announces-worlds-first-carbon-credits-for-use-in-airline-compliance-programme-corsia/>

Tabla2: Estado de los planes de acción estatales de la OACI de los países de la región (once países objetivos únicamente)

Medidas propuestas en el plan de acción	ARG	BHS	BRA	CHC	COG	DOM	ECU	ATS	MEX*	PAN	PER*
Plan de acción estatal presentado a la OACI	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Fecha de la publicación más reciente	2021	2022	2022	2022	2021	2021	2021	2020	2018	2018	2023
Infraestructura aeroportuaria	✓	✓		✓	✓	✓					
Gestión operativa (tráfico aéreo)	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓	
Investigación y desarrollo				✓							
Medidas fuera del sector			✓	✓	✓	✓		✓		✓	
SAF		✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓	
Eficiencia de la flota	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓	
Eficiencia energética					✓						
Otras medidas basadas en el mercado	✓					✓		✓			

* Los planes de acción de México y Perú no están disponibles al público.

1.4.1 Argentina

Tabla3: Contribución económica de la aviación en Argentina

PIB procedente de la aviación	Número de puestos de trabajo en el sector de la aviación
9100 millones de dólares (1,4 %) ³⁶	147 000

En 2024, Argentina puso en marcha una reforma de su política de aviación con el objetivo de liberalizar el sector. El paquete de medidas incluía la desregulación de las tarifas, el acceso al mercado abierto y un aumento de los derechos de las compañías aéreas extranjeras. También se han observado cambios en el código aeronáutico, en las asociaciones e inversiones de las aerolíneas, y en las infraestructuras y los servicios en tierra ³⁷.

³⁶ <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-value-of-air-transport-to-argentina/>

³⁷ <https://www.iata.org/contentassets/0b6d1c34ebb24fa390b6030be3327751/240712-arg-aviation-reforms-eng-final.pdf/>

En paralelo a esta reforma, Argentina ha estado trabajando activamente para reducir las emisiones en su sector de la aviación. En 2021, el país actualizó su estrategia nacional a través de su plan de acción estatal, coordinado por la Administración Nacional de Aviación Civil (ANAC)³⁸. Este plan se basa en esfuerzos anteriores publicados en 2014, que se centraban en mejorar la eficiencia energética de la aerolínea nacional del país (Aerolíneas Argentinas), lo que dio lugar al desarrollo de un Plan de Eficiencia de Combustible que se encuentra actualmente en implementación.

El enfoque de Argentina sigue siendo principalmente mejorar la eficiencia operativa. Aerolíneas Argentinas ya ha emprendido iniciativas como la modernización de su flota y la reducción del peso de las aeronaves para reducir el consumo de combustible³⁹. Al mismo tiempo, el país ha invertido en la mejora de los sistemas de navegación aérea, la instalación de estaciones meteorológicas automáticas, la modernización de los sistemas de aterrizaje por instrumentos y la optimización de las trayectorias de vuelo para reducir el consumo innecesario de combustible⁴⁰. Los aeropuertos también han experimentado mejoras, como la instalación de iluminación LED de bajo consumo, la renovación de pistas y la implementación de inventarios de emisiones y sistemas de separación de residuos. Paralelamente, Argentina está trabajando para regionalizar las operaciones aeroportuarias, con el fin de distribuir el tráfico aéreo de manera más eficiente y reducir las emisiones relacionadas con la congestión.

Los SAF son considerados un componente clave de la estrategia de reducción de emisiones de Argentina, aunque su desarrollo aún se encuentra en una fase inicial. Argentina se encuentra en una posición privilegiada para explorar la oportunidad de producir SAF gracias a la biomasa fácilmente disponible, que proporciona una materia prima sólida para SAF producido mediante el proceso Fischer-Tropsch, y a la producción actual de biocombustibles⁴¹. En estas etapas iniciales de desarrollo, se están apalancando las alianzas estratégicas para desarrollar *insights* claves. Por ejemplo, instituciones como el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) están explorando oportunidades para la producción de SAF. Mientras tanto, Airbus y la OACI anunciaron a principios de 2025 la financiación, a través del programa ACT-SAF (Asistencia, Construcción de Capacidades y Entrenamiento SAF), de un estudio de viabilidad de los SAF en el país⁴². Se han realizado inversiones iniciales con una notable colaboración entre GreenSinergy y Axens en Chubut, cuyo objetivo es producir SAF utilizando energía eólica y la ruta Fischer-Tropsch⁴³. El objetivo es producir 100 000 toneladas de SAF al año a partir de 2030, con planes de ampliar la producción a 500 000 toneladas.

Argentina también está comprometida con los esfuerzos internacionales de monitoreo de carbono. Desde 2019, todos los operadores aéreos registrados en Argentina están obligados a informar anualmente sus emisiones de CO₂ a la ANAC, de conformidad con el marco de trabajo global CORSIA. Además, el país ha implementado un impuesto sobre el carbono para el combustible de aviación (solo doméstica) y ha puesto

³⁸

https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/plan_de_accion_del_estado_argentino_para_la_reduccion_de_emisiones_de_co2_en_la_aviacion.pdf

³⁹ <https://ria.utn.edu.ar/server/api/core/bitstreams/eed56cf2-dbc4-4e66-893a-6c150130fc8b/content/>

⁴⁰ <https://www.aviacionline.com/airbus-and-icao-partner-to-study-sustainable-aviation-fuel-feasibility-in-argentina-panama-and-peru/>

⁴¹ <https://www.aviacionline.com/airbus-and-icao-partner-to-study-sustainable-aviation-fuel-feasibility-in-argentina-panama-and-peru/>

⁴² <https://www.aviacionline.com/airbus-and-icao-partner-to-study-sustainable-aviation-fuel-feasibility-in-argentina-panama-and-peru/>

⁴³ <https://www.axens.net/resources-events/news/greensinergy-and-axens-sign-memorandum-understanding-advance-saf-project-argentina-latin-america/>

en marcha programas de entrenamiento para crear conciencia sobre el cambio climático en el sector de la aviación.^{44, 45}

1.4.2 Bahamas

Tabla4: Contribución económica de la aviación en Bahamas

PIB procedente de la aviación	Número de puestos de trabajo en el sector de la aviación
N/A ⁴⁶	N/A

El sector de la aviación en Bahamas desempeña un papel fundamental a la hora de conectar las islas del archipiélago y respaldar su economía, la cual está impulsada por el turismo. En 2019, antes de la pandemia de COVID, Bahamas registró un número anual de pasajeros superior a 1,6 millones y unos ingresos de casi 4 millones de dólares⁴⁷. El sector está regulado principalmente por la Autoridad de Aviación Civil de Bahamas (CAAB) y el Departamento de Aviación, que depende del Ministerio de Transporte.⁴⁸ La CAAB es responsable de supervisar los servicios de tráfico aéreo, la concesión de licencias y la supervisión de la seguridad, mientras que la Autoridad de Servicios de Navegación Aérea de Bahamas (BANSÁ) gestiona la navegación aérea. La Ley de Aviación Civil y la Ley de la Autoridad de Servicios de Navegación Aérea proporcionan el marco de trabajo jurídico general para el sector de la aviación en el país.

Bahamas lanzaron su Plan Estratégico Nacional de Aviación en 2023, diseñado para posicionar al país como líder regional en aviación. El plan de ocho puntos describía los pilares fundamentales, desde la modernización de las infraestructuras hasta los servicios de transporte aéreo sostenibles, que se implementarán entre 2023 y 2026.⁴⁹ El plan establece objetivos y medidas concretas que debe aplicar el sector, como la puesta en marcha de la Semana Nacional de la Aviación de Bahamas, la mejora de la capacidad y la realización de evaluaciones de impacto ambiental para respaldar la ampliación de los aeropuertos. Como parte de ello, Bahamas se comprometió a crear un Grupo de Trabajo sobre Aviación Sostenible para desarrollar un Plan de Aviación Sostenible.

Es probable que este plan se base en el plan de acción del país para la reducción de emisiones de la aviación civil, publicado en 2022. El plan describía las medidas iniciales para el sector, entre las que se incluían la modernización de flota, la mejora de la gestión del tráfico aéreo y el uso de las infraestructuras, y medidas de conservación de la energía. Aunque los SAF no se definieron en el plan de acción del país, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) ha iniciado algunos estudios de viabilidad iniciales a través de un proyecto de cooperación técnica financiado⁵⁰.

El Gobierno también se había enfocado en modernizar su sector de la aviación con inversiones en infraestructuras aeroportuarias como parte del Programa de Renacimiento Aeroportuario de las Islas Family, cuyo objetivo era mejorar 14 aeropuertos para aumentar la seguridad y la eficiencia. El programa ha sido

⁴⁴ <https://www.iea.org/policies/19277-law-27430-on-taxing-liquid-fuels-and-carbon-dioxide/>

⁴⁵ <https://www.argentina.gob.ar/anac/cipe/>

⁴⁶ No hay información disponible para el público en el caso de las Bahamas.

⁴⁷ <https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/environmental-protection/Documents/ActionPlan/The-Bahamas-Action-Plan-for-Emissions-Reduction-APER-v1.pdf>

⁴⁸ <https://www.doabahamas.com/about>

⁴⁹ <https://www.doabahamas.com/plans-and-projects>

⁵⁰ <https://www.iadb.org/en/project/BH-T1130>

cancelado⁵¹. Desde entonces, el Gobierno ha anunciado un nuevo presupuesto para la aviación en el ejercicio fiscal 2025–2026⁵². Esto incluye el presupuesto para reforzar infraestructura, en particular para modernizar el Aeropuerto Internacional Lynden Pindling y otros planes para el Aeropuerto Internacional de Gran Bahama. Esto va acompañado de planes iniciales para una aviación sostenible mediante estudios de viabilidad sobre energías renovables en los aeropuertos y de incentivos para que las aerolíneas mejoren la eficiencia del combustible. También hay presupuesto para mejorar la conectividad y el turismo, la seguridad aérea y el entrenamiento, y la creación de empleo.

1.4.3 Brasil

Tabla5: Contribución económica de la aviación en Brasil

PIB procedente de la aviación	Número de puestos de trabajo en el sector de la aviación
46 400 millones de dólares (2,1 %) ⁵³	1,9 millones

El principal organismo responsable de la aviación en Brasil es la Agencia Nacional de Aviación Civil (ANAC), que supervisa áreas como la certificación e inspección de las aeronaves, operadores y organizaciones de mantenimiento, las regulaciones aeroportuarias y la aplicación de los estándares de seguridad y operativos. A principios de este año, Brasil anunció la creación del Fondo Nacional de Aviación, que ofrece 5000 millones de reales brasileños (aproximadamente 890 millones de dólares) en préstamos y garantías para apoyar la expansión de las aerolíneas, el desarrollo de rutas internacionales y proyectos de sostenibilidad⁵⁴.

Brasil es el único país de LAC que ha ratificado un objetivo de aviación sostenible, que exige a las aerolíneas reducir sus emisiones de CO₂, en lugar de un porcentaje fijo de mezcla de SAF. El proyecto de ley 528/20, conocido como la ley del Combustible del futuro, establece el Programa Nacional de Combustibles Sostenibles para la Aviación (ProBioQAV). La ley exige a los operadores aéreos reducir sus emisiones nacionales, comenzando con una reducción del 1 % en 2027, que aumentará hasta el 10 % en 2037⁵⁵. Este enfoque debería incentivar rutas de producción de SAF más eficientes en términos de carbono, pero podría tener consecuencias no deseadas que suponen una carga financiera adicional para los operadores, dada la incertidumbre actual sobre la capacidad del país para suministrar la cantidad esperada de SAF en un mercado libre y competitivo.

Brasil tiene un potencial significativo para convertirse en un productor líder de SAF para exportar a los mercados internacionales debido a sus abundantes materias primas para una variedad de rutas de producción de SAF. Esto brinda a Brasil la oportunidad de convertirse en un *hub* de abastecimiento de materias primas para SAF en la región y a nivel global, utilizando la infraestructura y las capacidades existentes para desarrollar el mercado de SAF. Brasil cuenta con un entorno propicio para SAF, respaldado por la producción actual de biocombustibles. Esto se debe a la Política Nacional de Biocombustibles de Brasil, *RenovaBio*, que apoya a los productores de biocombustibles para que certifiquen y comercialicen sus

⁵¹ <https://www.doabahamas.com/plans-and-projects>
⁵² <https://bahamasnational.com/bahamas-government-unveils-ambitious-aviation-plans-in-2025-2026-budget-communication/>
⁵³ <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-value-of-air-transport-to-brazil/>
⁵⁴ <https://www.aviacionline.com/brazilian-congress-approves-usd-890-million-financing-for-airlines>
⁵⁵ <https://www.gov.br/planalto/en/latest-news/2024/10/lula-enacts-fuel-of-the-future-law-201cbrazil-will-drive-the-worlds-largest-energy-revolution201d>

biocombustibles, y que además establece objetivos de reducción de emisiones⁵⁶. Los productores de SAF están comenzando a incursionar en el mercado brasileño, invirtiendo en materias primas y tecnologías novedosas, lo que muestra las oportunidades únicas que ofrece este mercado. Acelen está desarrollando una planta de SAF basado en palma con el objetivo de producir 20 000 barriles diarios de SAF y diésel renovable para 2028⁵⁷.

En agosto de 2024, el Gobierno brasileño anunció un paquete de financiación de 1090 millones de dólares para apoyar el desarrollo de SAF y biocombustibles marinos⁵⁸. Esta iniciativa, financiada por el Banco Nacional de Desarrollo Económico y Social (BNDES) y la Autoridad de Financiación de Estudios y Proyectos (FNEP), está adjudicando fondos a través de convocatorias de propuestas dirigidas a:

- Construcción de biorrefinerías.
- Desarrollo de investigación y desarrollo.
- Ingeniería y proyectos piloto.
- Adquisición de equipos y capital de trabajo.

Brasil también está desarrollando su propio mercado de carbono, en el que SAF y los créditos de carbono son medidas complementarias pero que abordan prioridades diferentes. Los SAF son muy relevantes para el sector agrícola en Brasil y son estratégico desde el punto de vista industrial. Brasil busca la coordinación de estos mercados en la región, en particular con Colombia y Chile, para reforzar las sinergias y eliminar las barreras comerciales⁵⁹. Sin embargo, Brasil aún no ha podido abordar los retos que plantean el costo adicional de SAF para los pasajeros y el consiguiente impacto en la conectividad, especialmente en las regiones remotas, aunque se espera que el impacto se extienda a todo el mercado.

1.4.4 Chile

Tabla6: Contribución económica de la aviación en Chile

PIB procedente de la aviación	Número de puestos de trabajo en el sector de la aviación
7900 millones de dólares (2,3 %) ⁶⁰	212 000 ⁶⁰

Los vuelos internacionales representaron solo el 25 % de las salidas origen-destino en Chile, y ocho de los diez principales destinos internacionales del país se encuentran en América Latina. En general, Chile representa el 5,1 % del tráfico aéreo regional, y el 65 % de sus salidas internacionales de pasajeros se dirigen a otros países de América Latina⁶¹. La industria aeronáutica en Chile está supervisada por la Dirección General de Aviación Civil (DGAC) y la Junta de Aviación Civil (JAC) del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones.

⁵⁶ <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/renovabio-1/renovabio-ingles>

⁵⁷ <https://bioenergyinternational.com/acelen-renewables-discloses-brazilian-biorefinery-details/>

⁵⁸ <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/imprensa/noticias/conteudo/bndes-e-finep-disponibilizam-6-bilhoes-de-reais-para-investimentos-em-combustivel-verde-para-aviacao-e-navegacao>

⁵⁹ Comunicaciones personales durante las reuniones de compromiso en Brasil (ANAC, CONAMA, Ministério da Fazenda).

⁶⁰ <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-value-of-air-transport-to-chile/>

⁶¹ <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-value-of-air-transport-to-chile/>

En materia de sostenibilidad de la aviación, Chile presentó su plan de acción estatal a la OACI en 2022⁶². Un elemento central de los esfuerzos de Chile es el programa Vuelo Limpio, una iniciativa público-privada que promueve la eficiencia energética, las mejoras operativas y la adopción de SAF. El programa es una colaboración con las principales aerolíneas, aeropuertos y distribuidores de combustible para supervisar las emisiones, implementar las mejores prácticas y desarrollar una Hoja de ruta SAF 2050. Esta hoja de ruta incluye el objetivo de cubrir al menos el 50 % de la demanda de combustible para la aviación civil con SAF para 2050. Chile está explorando alternativas para la producción de SAF y materias primas, incluyendo aceites, grasas y residuos biológicos y municipales, así como *e-fuels*⁶³.

Chile también está invirtiendo en tecnologías avanzadas de navegación aérea, infraestructura aeroportuaria sostenible y modernización de la flota para reducir las emisiones. El país está explorando el hidrógeno verde como una herramienta clave para la reducción de emisiones, con proyectos liderados por CORFO (Agencia de Desarrollo de la Producción) y alianzas internacionales, en particular con los Países Bajos. Chile ha actualizado su Plan de acción estatal en 2025, cuantifica las reducciones de CO₂ y planea desarrollar un marco de trabajo regulatorio para apoyar la producción y adopción de SAF.

1.4.5 Colombia

Tabla7: Contribución económica de la aviación en Colombia

PIB procedente de la aviación	Número de puestos de trabajo en el sector de la aviación
15 500 millones de dólares (4,3 %) ⁶⁴	921 000

Las operaciones regionales son claves para Colombia, ya que el 60 % de los 10 principales destinos desde Colombia se encuentran en LAC. Solo el 23 % del total de salidas en 2023 fueron tráfico aéreo internacional⁶⁵. En este contexto, Colombia tiene políticas de cielos abiertos con Argentina y Estados Unidos, y ha anunciado 110 nuevas rutas internacionales entre 2023 y 2024 para aumentar la conectividad internacional e impulsar el turismo⁶⁶. A partir de 2023, el turismo respaldado por la industria aeronáutica aportará 7600 millones de dólares a la economía del país. La Aeronáutica Civil de Colombia (Aerocivil) es el organismo regulador nacional de la aviación dependiente del Ministerio de Transporte⁶⁷. En el ejercicio de sus funciones, aprobó la creación de las nuevas rutas, como parte de su cometido de supervisar la gestión del espacio aéreo y las operaciones aeroportuarias, junto con la concesión de licencias a las compañías aéreas, los pilotos y el personal de mantenimiento, las inspecciones de seguridad y las investigaciones de accidentes, y garantizar el cumplimiento regulatorio internacional en materia de aviación.

En enero de 2025, Colombia firmó la Resolución 00090, por la cual se establece una hoja de ruta para SAF. En ella, se establece el objetivo de que Colombia se convierta en líder regional en la producción de SAF, con una producción de 100 millones de galones de SAF para 2035, cifra que aumentará hasta llegar a los 450 millones de galones para 2050⁶⁸. La hoja de ruta se centra en tres pilares: la reducción de emisiones del sector;

⁶² [https://www.icao.int/environmental-](https://www.icao.int/environmental-protection/Lists/States_Action_Plans/Attachments/160/Plan%20de%20Acción%20de%20Chile%202022.pdf)

[protection/Lists/States_Action_Plans/Attachments/160/Plan%20de%20Acción%20de%20Chile%202022.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2025/Envreport2025_70.pdf)
⁶³ https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2025/Envreport2025_70.pdf

⁶⁴ <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-value-of-air-transport-to-colombia/>

⁶⁵ <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-value-of-air-transport-to-colombia/>

⁶⁶ <https://aviacionaldia.com/en/2025/01/colombia-civil-aeronautics-authorized-110-international-air-routes-between-2023-and-2024.html>

⁶⁷ <https://www.aerocivil.gov.co/>

⁶⁸ <https://aviacionaldia.com/en/2025/01/green-future-of-aviation-in-colombia-roadmap-to-sustainable-fuels.html>

el desarrollo de una industria productiva y sostenible; y la transformación social y la inclusión. Estos se apoyan en cinco pilares transversales: facilitadores legales y regulatorios; promoción de la oferta y la demanda; despliegue de la cadena de suministro; desarrollo tecnológico, educativo e industrial, y financiación e inversiones. Ecopetrol, la empresa petrolera estatal de Colombia, lidera la innovación en materia de SAF en el país. En 2024, llevó a cabo con éxito pruebas industriales en su refinería de Cartagena, produjo 32 000 barriles de combustible de aviación coprocesado con aceites vegetales. Aunque aún no cuenta con la certificación completa de la OACI para SAF, este combustible supone un primer paso hacia la producción continua de SAF, prevista para 2028⁶⁹.

Además de SAF, Colombia también ha estado buscando descarbonizar sus aeropuertos. El Proyecto Dorado Max en Bogotá es uno de los mayores esfuerzos de modernización aeroportuaria en la región, su objetivo es integrar el diseño y las operaciones sostenibles en el aeropuerto El Dorado. El aeropuerto ha alcanzado el nivel 4 en el programa de acreditación de carbono de aeropuertos de la ACI, gracias a medidas como la instalación de 11 000 paneles solares⁷⁰.

El sector de la aviación en Colombia opera en el contexto de un mercado nacional de carbono. El país cuenta con un impuesto sobre el carbono desde 2016, que actualmente es de alrededor de 5,5 dólares por tonelada de CO₂e y se aplica a los combustibles de aviación. Las empresas pueden comprar créditos de carbono nacionales desde 2017 para compensar sus emisiones. Además, Colombia está desarrollando un sistema nacional de comercio de emisiones. El programa se encuentra en la primera fase, que consiste en probar y perfeccionar las reglas operativas, antes de aumentar gradualmente hasta su plena aplicación en 2030, tal y como establece la Ley de Acción Climática⁷¹.

1.4.6 República Dominicana

Tabla 8: Contribución económica de la aviación en República Dominicana

PIB procedente de la aviación	Número de puestos de trabajo en el sector de la aviación
12 900 millones de dólares (10,6 %) ⁷²	550 000

La mayoría de las salidas desde República Dominicana en 2023 fueron hacia Norteamérica (66 %), mientras que las salidas intrarregionales hacia otros países de América Latina representaron el 21 % del total. República Dominicana ha experimentado un aumento del 62,7 % en las salidas de pasajeros durante la última década, lo que representa algo más del 10 % del tráfico internacional de pasajeros de la región. El país cuenta con siete aeropuertos con vuelos comerciales programados y está conectado con 45 países mediante vuelos directos.⁷³ Esto se ve respaldado por una política de cielos abiertos con países como Estados Unidos. El sector de la aviación en República Dominicana está regulado por tres organismos principales⁷⁴:

⁶⁹ https://www.icao.int/SAM/Documents/2025-RAAC18/RAAC18_WP34_Environment_SAF.pdf

⁷⁰ <https://ala.aero/2023/09/el-dorado-international-airport-attains-milestone-as-the-first-airport-in-latin-america-and-the-caribbean-to-achieve-level-4-transformation-in-aca-program/>

⁷¹ https://icapcarbonaction.com/system/files/ets_pdfs/icap-etsmap-factsheet-92.pdf

⁷² <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-value-of-air-transport-to-dominican-republic/>

⁷³ <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-value-of-air-transport-to-dominican-republic/>

⁷⁴ <https://www.mesalex.com/blog-en/regulation-of-civil-aviation-in-the-dominican-republic>

- Junta de Aviación Civil (JAC): organismo gubernamental responsable de regular los aspectos económicos de la aviación civil, incluyendo la concesión de acceso al mercado y la negociación de acuerdos de servicios aéreos.
- Instituto Dominicano de Aviación Civil (IDAC): supervisa los aspectos técnicos y operativos de la aviación, tales como los servicios de navegación aérea, la supervisión de la seguridad y la emisión de Certificados de Operador Aéreo (AOC).
- Cuerpo Especializado de Seguridad Aeroportuaria y de la Aviación Civil (CESAC): responsable de implementar y hacer cumplir las medidas de seguridad aérea, incluido el Programa Nacional de Seguridad de la Aviación Civil.

El Plan de Acción de República Dominicana para la Reducción de Emisiones de CO₂ (DRAPER) describe una hoja de ruta para reducir las emisiones de la industria aeronáutica mediante un conjunto de medidas⁷⁵. El país está alentando a las aerolíneas a modernizar sus flotas y actualizar los motores para cumplir con los últimos estándares medioambientales de la OACI. Entre tanto, también está promoviendo iniciativas de sostenibilidad en los aeropuertos, en consonancia con el conjunto de herramientas Eco-Airport Toolkit de la OACI. Los aeropuertos deben implementar un Sistema de Gestión Ambiental en concordancia con el Reglamento Aeronáutico Dominicano N.º 14⁷⁶. A través de esto, los aeropuertos están implementando medidas de gestión de residuos y desarrollando la generación de electricidad a partir de energías limpias, en particular mediante el uso de paneles solares.

Además, el país ha llevado a cabo un estudio de viabilidad como parte del proyecto de la OACI-UE para evaluar el potencial de producción de SAF. El estudio consideró que la materia prima más prometedora es la caña de azúcar, dada su abundancia en el país y el actual nivel de abandono de muchas de las áreas adecuadas, que podrían utilizarse para crear SAF a través de *Alcohol to Jet* (AtJ) o isoparafinas sintéticas (SIP)^{75, 77}. Actualmente, República Dominicana ya está apoyando la ampliación de SAF, proporcionando incentivos para los combustibles alternativos a través de la Ley 57-07, que ofrece exenciones tributarias para proyectos de energía renovable.⁷⁸ Estos esfuerzos se ven respaldados por la Declaración de Santo Domingo, que se compromete con el desarrollo y el uso de combustibles alternativos para la aviación, firmada en 2023 por una variedad de partes interesadas claves, desde ministerios hasta instituciones⁷⁹.

1.4.7 Ecuador

Tabla9: Contribución económica de la aviación en Ecuador

PIB procedente de la aviación	Número de puestos de trabajo en el sector de la aviación
4600 millones de dólares (3,9 %) ⁸⁰	330 000

⁷⁵ https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/FeasibilityStudy_DomRep_ENG_Web.pdf

⁷⁶ www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2025/Envreport2025_106.pdf

⁷⁷ Comunicaciones personales durante las reuniones de compromiso en la República Dominicana (Segunda reunión sobre combustible de aviación sostenible como parte del marco de trabajo del Proyecto ASCENT93, 28/03/2025)

⁷⁸ <https://www.iea.org/policies/5290-law-57-07-on-incentives-for-development-of-renewable-energy-sources-and-its-special-regimes>

⁷⁹ <https://dominantoday.com/dr/local/2023/04/25/dominican-republic-launches-action-plan-to-reduce-co2-emissions-in-aviation/>

⁸⁰ <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-value-of-air-transport-to-ecuador/>

La mayor parte de las salidas desde Ecuador en 2023 fueron hacia destinos nacionales, lo que representó el 60 % de las salidas⁸¹. A nivel internacional, Norteamérica fue el principal destino de los pasajeros que salieron de Ecuador en 2023, y estas rutas representaron el 45 % del total de los viajes. Otros países de América Latina representaron el 39 % de los destinos. Ecuador ha experimentado un crecimiento del 11,4 % en las salidas durante los últimos diez años.

La Dirección General de Aviación Civil (DGAC) es el principal organismo gubernamental responsable de la política aeronáutica en Ecuador. Opera bajo el marco de trabajo jurídico establecido por la Ley de Aviación Civil de Ecuador y forma parte de la estructura gubernamental más amplia que supervisa el transporte y la infraestructura. En los últimos años, Ecuador ha impulsado la mejora de la conectividad, la reducción de los costos y la atracción de más aerolíneas como parte de su Agenda Estatal, que reconoce la aviación y el turismo como elementos cruciales para el desarrollo del país. Un método clave para lograrlo ha sido la reducción de impuestos. Los impuestos como el *EcoDelta* (para salidas internacionales) y *el Potencia Turística* (para llegadas internacionales) se redujeron en 2023. Ambos impuestos aplicaban anteriormente una tarifa fija por tiquete aéreo, que ahora se ha cambiado por un sistema escalonado con un cargo máximo⁸². Esto ha dado lugar a una disminución de los precios para los pasajeros. Ecuador también ha comenzado a reconocer los Certificados de Operador Aéreo (AOC) de otros países de la región para fomentar la entrada de nuevas aerolíneas en el país⁸³.

La DGAC es responsable de minimizar el impacto medioambiental de la aviación en Ecuador y supervisa la certificación y las aprobaciones de cumplimiento medioambiental para el sector⁸⁴. Ecuador se encuentra en las primeras etapas del proceso de reducción de emisiones de la aviación, sin ninguna legislación específica vigente. Los SAF han sido identificados como una oportunidad para el país, con materias primas potenciales que incluyen caña de azúcar, aceite de palma y soya, y residuos sólidos urbanos (MSW)⁸⁵.

1.4.8 El Salvador

Tabla 10: Contribución económica de la aviación en El Salvador

PIB procedente de la aviación	Número de puestos de trabajo en el sector de la aviación
1500 millones de dólares (4,4 %) ⁸⁶	118 000

El número de pasajeros en El Salvador ha crecido un 98,9 % en los últimos diez años. El 100 % de sus salidas son internacionales, ya que el país solo cuenta con un aeropuerto con vuelos comerciales programados. La mayoría de los pasajeros (74 %) viajó a Norteamérica en 2023, siendo los cinco destinos principales para los pasajeros procedentes de El Salvador Los Ángeles, Washington, Houston, Nueva York y Miami⁸⁷. La Autoridad de Aviación Civil (AAC) es la encargada de regular la aviación civil en el país⁸⁸. Supervisa la aplicación del marco de trabajo jurídico, la Ley Orgánica de Aviación Civil. El Salvador también se alinea estrechamente con muchas

⁸¹ <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-value-of-air-transport-to-ecuador/>

⁸² <https://www.primicias.ec/noticias/economia/gobierno-tasas-aereas-ecodelta-potencia-turistica/>

⁸³ <https://aviationweek.com/air-transport/safety-ops-regulation/ecuador-accelerates-airline-entry-process-expand-market-access>

⁸⁴ <https://www.gob.ec/dgac>

⁸⁵ <https://news.mit.edu/2025/toward-sustainable-decarbonization-aviation-latin-america-0121>

⁸⁶ <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-value-of-air-transport-to-el-salvador/>

⁸⁷ <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-value-of-air-transport-to-el-salvador/>

⁸⁸ <https://www.aac.gob.sv/>

políticas de la OACI, como el Plan Global de Navegación Aérea, que establece los objetivos para la modernización de los equipos, los procedimientos y la infraestructura, con especial atención a la seguridad, la eficiencia y la sostenibilidad⁸⁹. El plan describe las mejoras en los equipos y procedimientos, la navegación basada en el desempeño y los sistemas de monitoreo y notificación para realizar un seguimiento de las mejoras.

El Salvador se encuentra en las primeras etapas de descarbonización de su sector de la aviación. En su Plan de Acción Estatal, el país ha descrito que desde hace varios años se han adoptado medidas para mejorar la eficiencia y modernizar la flota⁹⁰. También se están realizando esfuerzos para mejorar la gestión del tráfico aéreo, los procesos de rodaje y el uso de combustible. El Salvador señala en el Plan que, si bien se reconoce que SAF es una palanca clave para la reducción de emisiones, el principal reto es lograr el compromiso de múltiples partes interesadas para desarrollar dichos combustibles.

En 2024, el Banco de Desarrollo de América Latina y el Caribe (CAF) acordó proporcionar 320 millones de dólares al programa de desarrollo del sector aeronáutico de El Salvador llamado «El Salvador Vuela».⁹¹ Estos recursos se entregarán a través de tres proyectos dirigidos a los aeropuertos del país, incluido el único aeropuerto comercial, que también se encuentra en proceso de ampliación. Este dinero apoyará la modernización del sector, junto con mejoras para aumentar la resiliencia ante desastres naturales y esfuerzos para mejorar la eficiencia de costos y reducir los tiempos de viaje aéreo.

Como parte de los esfuerzos internacionales de reducción de emisiones, El Salvador se ha adherido a la fase voluntaria del programa CORSIA. El Salvador también es miembro de la Coalición por el Clima y el Aire Limpio (CCAC), está comprometido a: Reducir los gases de efecto invernadero y los contaminantes climáticos de corta duración, aplicar el Plan Nacional sobre el Cambio Climático (2022-2026) y la Política Nacional de Medio Ambiente (2022).

1.4.9 México

Tabla 11: Contribución económica de la aviación en México

PIB procedente de la aviación	Número de puestos de trabajo en el sector de la aviación
88 300 millones de dólares (4,9 %) ⁹²	1 800 000

La mayoría de las salidas desde los aeropuertos mexicanos en 2023 fueron hacia destinos nacionales (66 %), con 57 aeropuertos en el país con vuelos comerciales programados. Los diez principales destinos internacionales desde México en 2023 fueron todos en aeropuertos de Norteamérica, y solo el 10 % de los pasajeros salieron hacia aeropuertos fuera del continente americano. El sector de la aviación civil en México está supervisado por la Agencia Federal de Aviación Civil (AFAC), que opera bajo la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transporte (SICT)⁹³.

⁸⁹ <https://www.icao.int/NACC/Documents/Meetings/2018/ASBU18/ANP06-ElSalvador.pdf>

⁹⁰ https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/State_Action_Plans/PLAN-DE-ACCION-DE-REDUCCION-DE-CO2-DEL-ESTADO-ECUATORIANO-2021-2024-signed.pdf

⁹¹ <https://www.caf.com/en/currently/news/caf-supports-the-leap-in-air-and-digital-connectivity-in-el-salvador-with-usd-465-million-in-loans/>

⁹² <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-value-of-air-transport-to-mexico/>

⁹³ <https://centreforaviation.com/data/profiles/government-bodies/federal-civil-aviation-agency-afac-mexico/>

México fue uno de los primeros países en presentar su Plan de acción estatal para la reducción de emisiones de la aviación a la OACI en 2012 y lo actualizó en 2018; aunque el documento no es público, el país está explorando oportunidades para hacer crecer su ecosistema de SAF, basándose en una larga tradición de iniciativas e investigaciones sobre el tema⁹⁴. En junio de 2025, Airbus firmó un acuerdo con la aerolínea mexicana Volaris para apoyar el Fondo Voluntario para el Medio Ambiente de la OACI, con el fin de financiar un estudio de viabilidad sobre SAF a través del programa ACT-SAF de la OACI⁹⁵. En paralelo, México pretende iniciar la producción nacional de SAF para 2030. La empresa estatal mexicana Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA), principal proveedor de combustible de aviación del país, colabora estrechamente con AFAC en grupos de trabajo técnicos sobre combustibles sostenibles para la aviación. ASA lanzó un proyecto piloto que combina SAF importado de los Estados Unidos con combustible convencional⁹⁶.

El Plan México (publicado en enero de 2025) incluye SAF como prioridad nacional. La Ley de Biocombustibles, promulgada en marzo de 2025, junto con sus futuras regulaciones de aplicación (en proceso de elaboración al momento de la redacción del presente informe), representa una oportunidad clave para establecer criterios claros e inclusivos, alineados con los estándares internacionales para la producción y certificación de SAF. Se han creado grupos de trabajo interinstitucionales (AFAC, ASA, SEMARNAT, SENER, CONADESUCA, SADER, SICT) para armonizar políticas, validar datos y definir criterios de sostenibilidad y certificación. México también fue reelegido como miembro del Consejo de la OACI y reafirmó su compromiso de seguir trabajando para alcanzar los objetivos⁹⁷ estratégicos de la OACI.

México ha participado voluntariamente en el programa CORSIA y ha explorado la reducción de emisiones de los aeropuertos a través del programa de Acreditación de Carbono de Aeropuertos (ACA). Actualmente, 45 aeropuertos de México se han adherido a la ACA y están avanzando en la reducción de sus emisiones de carbono⁹⁸. El Grupo Aeroportuario de Sureste (ASUR) es un operador aeroportuario clave en México y cuenta con un plan de acción climática alineado con la iniciativa Science-Based Targets (SBTi). A raíz de esto, más del 50 % de sus aeropuertos en México han instalado paneles solares, mientras que algunos han instalado baterías para mejorar el almacenamiento de energía. Dos aeropuertos también han introducido vehículos eléctricos para las operaciones en tierra^{99, 100}

1.4.10 Panamá

Tabla 12: Contribución económica de la aviación en Panamá

PIB procedente de la aviación	Número de puestos de trabajo en el sector de la aviación
6800 millones de dólares (8,2 %) ¹⁰¹	194 000

El 90 % de las salidas desde Panamá en 2023 tuvieron destinos internacionales, y la mayoría voló a otro país de América Latina (57 %)¹⁰². Las salidas de pasajeros de Panamá han aumentado un 38,5 % en la última década,

⁹⁴ Comunicaciones personales durante las reuniones de compromiso en México (ASA, CONADESUCA)
⁹⁵ <https://mexicobusiness.news/aerospace/news/airbus-volaris-sign-agreement-back-icao-saf-study-mexico>
⁹⁶ <https://www.argusmedia.com/en/news-and-insights/latest-market-news/2697517-mexico-s-asa-to-play-key-role-in-saf-expansion>
⁹⁷ <https://www.icao.int/news/all-incoming-icao-council-member-states-elected>
⁹⁸ <https://www.airportcarbonaccreditation.org/accredited-airports/>
⁹⁹ <https://www.airportcarbonaccreditation.org/nine-asur-airports-in-mexico-achieve-level-3-in-airport-carbon-accreditation/>
¹⁰⁰ <https://www.asur.com.mx/responsabilidad-social-0>
¹⁰¹ <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-value-of-air-transport-to-panama/>
¹⁰² <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-value-of-air-transport-to-panama/>

respaldadas por 26 aerolíneas operativas, ocho aeropuertos comerciales y 23 nuevas rutas internacionales en los últimos cinco años. El principal organismo regulador de la aviación civil de Panamá, la Autoridad de Aviación Civil, supervisa la aplicación de las principales regulaciones aeronáuticas del país¹⁰³.

Panamá ha definido la «Misión Panamá», una estrategia gubernamental para descarbonizar la economía. Esto incluye el objetivo de utilizar un 70 % de energía renovable para 2050, centrándose en la energía solar y eólica. Para respaldar esta iniciativa, el Gobierno ha introducido un incentivo fiscal del 25 % para las empresas que inviertan en nuevos proyectos de energía limpia, en función de los niveles de reducción de carbono¹⁰⁴. Panamá ha puesto en marcha una Alianza Carbono Negativo con Bután y Surinam, y está colaborando con Costa Rica, Colombia y Ecuador para promover la protección de la biodiversidad.

En este contexto, Panamá publicó en 2018 un Plan de Acción Estatal para la reducción de emisiones de la aviación, en el que se esbozan una serie de medidas para descarbonizar el sector de la aviación. El país busca mejorar la eficiencia operativa mediante actualizaciones en la gestión del tráfico aéreo, la mejora de la eficiencia de la flota y la introducción de fuentes de energía renovables para los servicios en tierra¹⁰⁵. El principal aeropuerto del país, el Aeropuerto Internacional de Tocumen, está estudiando actualmente una ampliación que incluiría una tercera pista, con el objetivo principal de aumentar la distribución de carga desde el aeropuerto¹⁰⁶. La anterior ampliación del aeropuerto se incluyó en el Plan de Acción del país, que incluía medidas para mejorar la accesibilidad del aeropuerto, reducir la congestión en la pista y mejorar el apoyo en tierra para el reabastecimiento de combustible. No se ha anunciado ningún plan específico de sostenibilidad para esta próxima ampliación.

La Estrategia Nacional de Panamá para el Hidrógeno Verde y sus Derivados establece objetivos tanto para los derivados del hidrógeno renovable como para SAF, con el fin de que, para 2050¹⁰⁷, el 30 % del suministro energético de la aviación provenga del hidrógeno, sus derivados o SAF. La estrategia establece objetivos generales clave, como convertirse en un centro energético sostenible facilitando el uso del H2V en el transporte aéreo y marítimo, y crear un marco de trabajo jurídico y regulatorio que respalde la inversión y el desarrollo de infraestructuras. Además de aumentar la producción de hidrógeno, Panamá tiene previsto comenzar la producción de SAF en 2027 desde la Biorrefinería Ciudad Dorada¹⁰⁸. La planta tiene una capacidad prevista de 2600 millones de galones al año, lo que la convierte en una de las más grandes instalaciones de producción planeadas de SAF a nivel global. El proyecto, que consiste en convertir aceites cultivados con fines específicos, grasas residuales y grasas en SAF, es liderado por SGP BioEnergy, en colaboración con Topsoe y Fluor.

¹⁰³ <https://aeronautica.gob.pa/>

¹⁰⁴ <https://missionpanama.gob.pa/boldly-sustainable/>

¹⁰⁵ [https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/environmental-protection/Documents/ActionPlan/SAP-PTY-\(ES\)-compressed.pdf](https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/environmental-protection/Documents/ActionPlan/SAP-PTY-(ES)-compressed.pdf)

¹⁰⁶ <https://en.tocumenpanama.aero/index.php/futuro>

¹⁰⁷ https://www.gacetaoficial.gob.pa/pdfTemp/29771_B/98196.pdf

¹⁰⁸ <https://www.safinvestor.com/project/142197/sgp-bioenergy-golden-city-biorefinery-panama/>

1.4.11 Perú

Tabla13: Contribución económica de la aviación en Perú

PIB procedente de la aviación	Número de puestos de trabajo en el sector de la aviación
6 200 millones de dólares (2,3 %) ¹⁰⁹	364 000

La mayoría de las salidas desde Perú en 2023 fueron hacia destinos domésticos (78 %), utilizando los 23 aeropuertos del país con vuelos comerciales programados¹¹⁰. Del 22 % de salidas internacionales, la mayoría de los pasajeros viajaron a otro país latinoamericano (46 %), seguido de cerca por Norteamérica (35 %). El sector de la aviación civil del Perú está regulado por la Dirección General de Aviación Civil, dependiente del Ministerio de Transportes y Comunicaciones. La Dirección ha supervisado el desarrollo del Plan Nacional de Aviación Civil, que se ajusta a la metodología NASP de la OACI. El plan incluye medidas estratégicas para hacer frente a la duplicación del tráfico aéreo anticipada para Sudamérica en los próximos 15 años¹¹¹. En este contexto, las salidas de pasajeros de Perú han crecido un 8,7 % en los últimos diez años^{Error! Argumento de modificador no especificado.}.

Perú se encuentra en las primeras etapas de la estrategia de reducción de emisiones y su Plan de Acción Estatal para la descarbonización de la aviación no está disponible al público. A pesar de ello, el país está explorando opciones para la reducción de emisiones de la aviación. Por ejemplo, Airbus está colaborando con la OACI para realizar estudios de factibilidad de los SAF en Perú, como parte del programa ACT-SAF¹¹². Se trata de explorar la disponibilidad potencial de materias primas, las necesidades de infraestructura y la viabilidad económica de SAF en el país. Mientras tanto, el Aeropuerto Jorge Chávez ha completado una nueva instalación de almacenamiento de combustible para aviación ¹¹³. La instalación está totalmente automatizada y, con el tiempo, incorporará una nueva flota de vehículos de suministro de combustible, algunos de los cuales serán totalmente eléctricos.

¹⁰⁹ <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-value-of-air-transport-to-peru/>

¹¹⁰ <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-value-of-air-transport-to-peru/>

¹¹¹ <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/Heightening-cooperation-to-support-aviation-recovery-and-development-in-Peru.aspx>

¹¹² <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/act-saf.aspx>

¹¹³ <https://exolum.com/en/noticia/exolum-begins-operations-at-limas-new-airport-following-completion-of-latin-americas-most-advanced-fuel-storage-facility/>

2 Actividad de vuelo en LAC



El objetivo de esta sección es detallar el pronóstico de la actividad para la región, incluyendo el pronóstico de la demanda futura de pasajeros, carga, vuelos y movimientos de transporte aéreo (ATM). En esta sección se detallarán los métodos seguidos antes de analizar los resultados tanto a nivel nacional como internacional.

Resultados claves Pronóstico de la actividad:

- Se proyecta que LAC tenga 815 millones de pasajeros de salida en 2050, lo que representa una CAGR del 2,7 % en comparación con 2019 en un escenario de línea base en el que no se implementan medidas de reducción de carbono.
- Brasil, México y Colombia siguen siendo los tres países con mayor volumen de pasajeros.
- Los volúmenes de carga dedicada crecerán a una CAGR del 3,1 % a partir de 2019, hasta alcanzar los 3,3 millones de toneladas métricas en 2050.
- El número de movimientos de aeronaves (ATM) alcanzará los 5,9 millones, lo que se traduce en una CAGR del 1,8 % entre 2019 y 2050.

2.1 Actividad del transporte aéreo en LAC

En 2024, los aeropuertos de LAC prestaron servicio a 385 millones¹¹⁴ de pasajeros embarcados, lo que representa el 8 % del tráfico aéreo global de pasajeros. Esto supone un aumento del 9 % con respecto a la cifra de 2019, lo que indica una sólida recuperación después del COVID. La región ha experimentado un crecimiento relativamente fuerte del tráfico de pasajeros entre 2009 y 2019, con una tasa de CAGR del 6,4 %, impulsado por el aumento de la riqueza y la entrada de las aerolíneas de bajo costo, que estimularon aún más la demanda.

En términos de movimientos de aeronaves, en 2024 se registraron 3,2 millones de movimientos de salida desde la región LAC, lo que representa el 8 % del total global. No obstante, esto solo representa el 98 % del nivel de 2019, lo que implica que el número de pasajeros por movimiento ha aumentado en comparación con el periodo anterior al COVID. A diferencia del tráfico de pasajeros, los ATM solo han registrado una CAGR del 1,0 % entre 2009 y 2019, lo que implica una mejora continua en el factor de carga y un aumento del tamaño de las aeronaves.

En cuanto al transporte de mercancías, se estima que los aeropuertos de la región habrán procesado cerca de 1,8 millones de toneladas de carga dedicada en 2024 con salida desde la región. Esto supone un aumento del 40 % con respecto al nivel de 2019.

2.2 Metodología, fuentes de datos y supuestos

En esta sección se describe el enfoque de ICF, los flujos de pasajeros y carga considerados en el alcance, y las principales fuentes de datos y supuestos utilizados para calcular los pronósticos de la actividad.

2.2.1 Metodología

La actividad aérea y el suministro de combustible dependen del volumen de pasajeros y carga; por lo tanto, los pronósticos del combustible y las emisiones de CO₂ se basan en los pronósticos de demanda de pasajeros y carga para la región. Luego, estas proyecciones se convirtieron en pronósticos de la actividad de vuelo y del consumo de combustible.

La siguiente figura ofrece un resumen de alto nivel del enfoque de los pronósticos. En primer lugar, se elaboraron proyecciones de la demanda de los pasajeros y de la demanda de carga. Luego, estas proyecciones de la demanda se convirtieron en pronósticos de la actividad considerando los tipos de flota, el tamaño de las aeronaves, las tasas de ocupación y las distancias entre sectores. Estas métricas de la actividad también se convirtieron en consumo de combustible, con base en las tasas de consumo de combustible

¹¹⁴ Salidas únicamente desde países ALTA. Consulte la sección 2.2.2. para obtener más detalles.

actuales y esperadas para cada segmento y mercado estudiado. Los resultados respaldan el resto del estudio, ayudan a dimensionar la oportunidad de los SAF, a estimar la demanda y determinar el nivel de compensación necesario en todos los países de este estudio.

Proceso de metodología del pronóstico de la demanda, actividad y requerimiento de combustible



Fuente: análisis de ICF.

Para pronosticar la demanda de pasajeros, se utilizó un enfoque ascendente para el pronóstico a corto plazo y un enfoque descendente para el pronóstico a largo plazo. Ambos utilizaron datos de 2019 como línea base. El módulo ascendente a corto plazo se centra en 2025–2026, teniendo en cuenta las tendencias de recuperación del mercado, la capacidad futura de asientos registrada por las aerolíneas y el desempeño del factor de carga.

Luego, el modelo pasa al enfoque macroeconómico descendente a largo plazo, que abarca el período comprendido entre 2027 y 2050. Dado que la demanda de tráfico tiene una fuerte correlación con la actividad económica, ALTA ha encargado a una universidad argentina (Universidad de San Andrés, UdeSA) que determine este factor (factor de elasticidad ingreso de la demanda).

El estudio utilizó un modelo de panel econométrico a nivel de ruta (especificación *log-log*) para estimar el factor de elasticidad ingreso de la demanda.

El análisis partió de la recopilación de datos históricos relacionados con el transporte aéreo entre 2014 y 2024 que fueron proporcionados por ALTA y que complementó con cifras de capacidad de Cirium que abarcaban todas las actividades hacia y desde la región. La configuración completa del conjunto de datos incluye información esencial como el número de pasajeros, las tarifas medias, los kilómetros-pasajero de ingresos (RPK), los Asientos-Kilómetro Disponibles (ASK), la capacidad de asientos, la división por puntos de origen y el tipo de aeronave, divididos por aerolíneas, meses y pares de ciudades. El estudio define los mercados a nivel de origen-destino-mes, por lo que el conjunto de datos se estructura como un panel mensual a nivel de ruta (O-D-mes). Además, para garantizar que el resultado refleje las condiciones típicas del mercado, se excluyen los datos del año 2020, ya que el transporte aéreo se vio muy afectado por la pandemia del COVID. En cuanto a los datos macroeconómicos, el PIB per cápita real y la población fueron tomados de la base de datos del informe Perspectivas de la Economía Mundial (WEO) del Fondo Monetario Internacional (FMI) para garantizar la comparabilidad entre los diferentes países. Además, los precios del combustible de aviación proporcionados por S&P Global Energy por medio de ALTA se incorporan como factores exógenos de variación de los costos, fundamentales para abordar cualquier preocupación relacionada con la endogeneidad de las tarifas. El estudio utiliza los precios del combustible de aviación como parte de la estrategia de variables instrumentales, pero, más concretamente, analiza la interacción entre los precios del combustible y la distancia de las rutas (con retrasos) y emplea un instrumento basado en la red.

Para estimar elasticidad, se consideraron por separado el precio y los ingresos del origen y el destino, y se calcula la elasticidad efectiva de los ingresos a nivel de ruta utilizando las cuotas de pasajeros en el punto de origen (POO). Las ponderaciones del POO no forman parte del proceso de estimación en sí, sino que se aplican tras la combinación de coeficientes. Se ajustaron factores externos, tales como las recesiones, para rutas con características similares, pero el informe tiene en cuenta principalmente las perturbaciones macroeconómicas mediante efectos fijos en el tiempo y controles adicionales (por ejemplo, indicadores estacionales o variables relacionadas con el COVID), en lugar de ajustar directamente los efectos de la recesión por tipo de ruta. Por ejemplo, la ruta São Paulo–Miami se clasificó como un mercado internacional de negocios de larga distancia y se ajustó para tener en cuenta las interrupciones habituales en este tipo de mercado. El modelo también superó las comprobaciones de solidez mediante la introducción de covariables exógenas adicionales, tales como los tipos de cambio bilaterales, los índices de inflación y las medidas de estructuras competitivas (por ejemplo, el índice Herfindahl–Hirschman, el número de compañías aéreas activas y la cuota de servicios sin escalas).

IATA también proporciona una estimación de alto nivel de la elasticidad ingreso–demanda en un documento publicado en 2008¹¹⁵, en el que se correlacionan los viajes aéreos per cápita con los ingresos per cápita de diversos países. El análisis reveló una relación fuerte y positiva entre los dos parámetros.

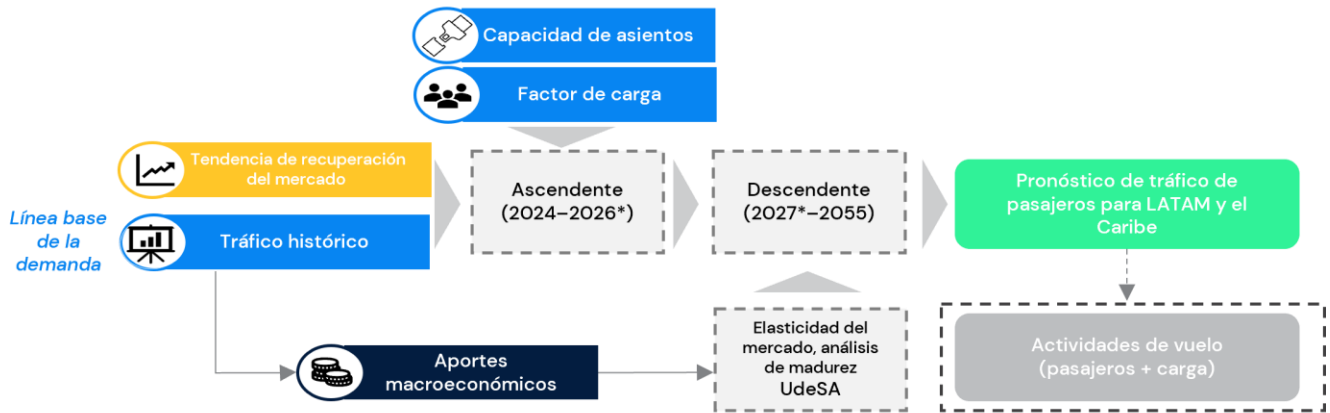
Tabla14: Elasticidad de los ingresos por fuente y flujo de tráfico

Segmentos de mercado	UdeSA	Errores estándar	IATA
	Elasticidad de los ingresos		Elasticidad de los ingresos
Doméstico	1,395	0,281	n/a
Internacional	0,803	0,086	n/a
Corta distancia	0,623	0,106	1,3 a 1,8
Media distancia	0,909	0,104	1,4 a 1,8
Larga distancia	0,939	0,168	1,5 a 2,0
Sur América–Sur América	0,513	0,135	n/a
Centroamérica –Norte América	0,853	0,177	n/a
Caribe–Norte América	1,154	0,135	n/a
Sur América –Norte América	0,447	0,157	n/a
Centroamérica –Centroamérica	1,584	0,716	n/a
Sur América –Centroamérica	0,094	0,206	n/a
Sur América–Caribe	0,489	0,179	n/a
Caribe–Caribe	1,622	0,619	n/a

Este multiplicador de elasticidad de ingresos proporcionado por la UdeSA se aplicó luego al pronóstico del PIB para obtener una proyección del número de pasajeros para la región a largo plazo. La siguiente figura ilustra la metodología de los pronósticos de pasajeros.

¹¹⁵ Demanda de transporte aéreo, IATA, abril de 2008.

Para pronosticar la demanda de pasajeros se combinaron dos enfoques: el ascendente y el descendente



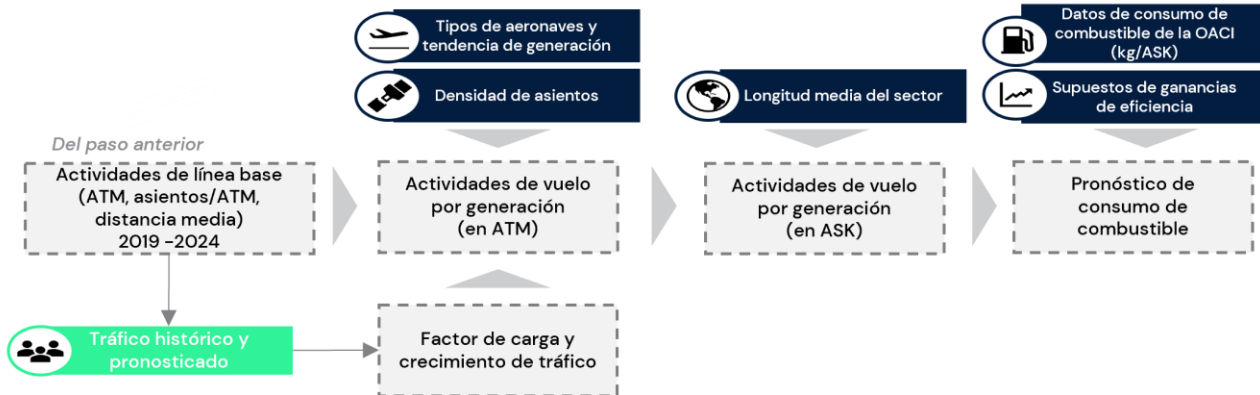
Fuente: análisis de ICF.

Luego, el pronóstico del tráfico de pasajeros se convirtió en un pronóstico de la actividad y del consumo de combustible, transformando el número de pasajeros en asientos-kilómetro disponibles (ASK) e incorporando un valor de consumo de combustible por ASK por tipo de aeronave, utilizando la base de datos de consumo de combustible de la OACI.

Para convertir el número de pasajeros en ASK, se asume un factor de carga a nivel de pares de países basado en las tendencias históricas, y se asume un pequeño crecimiento del factor de carga, ya que las aerolíneas continúan optimizando la capacidad para aumentar la rentabilidad. Después, el número de asientos se asigna a diferentes categorías de aeronaves. Se tuvieron en cuenta tanto los tipos de aeronaves actuales como futuras, y la transición se asignó utilizando un conjunto de datos de la flota propiedad de ICF. Luego, se combinó el total de asientos por categoría de aeronave con la longitud media del sector a nivel de pares de países para obtener el ASK por categoría de aeronave. Esto se combinó con los datos de consumo de combustible por ASK de la OACI para proporcionar una estimación del consumo de combustible.

También se han tenido en cuenta las mejoras en la eficiencia, incluyendo el ahorro de combustible gracias a los cambios de aeronaves dentro de una misma generación, los cambios de aeronaves entre generaciones y las mejoras en la eficiencia operacional. Estos se describen con más detalle en las siguientes secciones. La siguiente figura resume la metodología utilizada para el pronóstico de la actividad y del consumo de combustible.

Metodología para pronosticar la actividad y el consumo de combustible

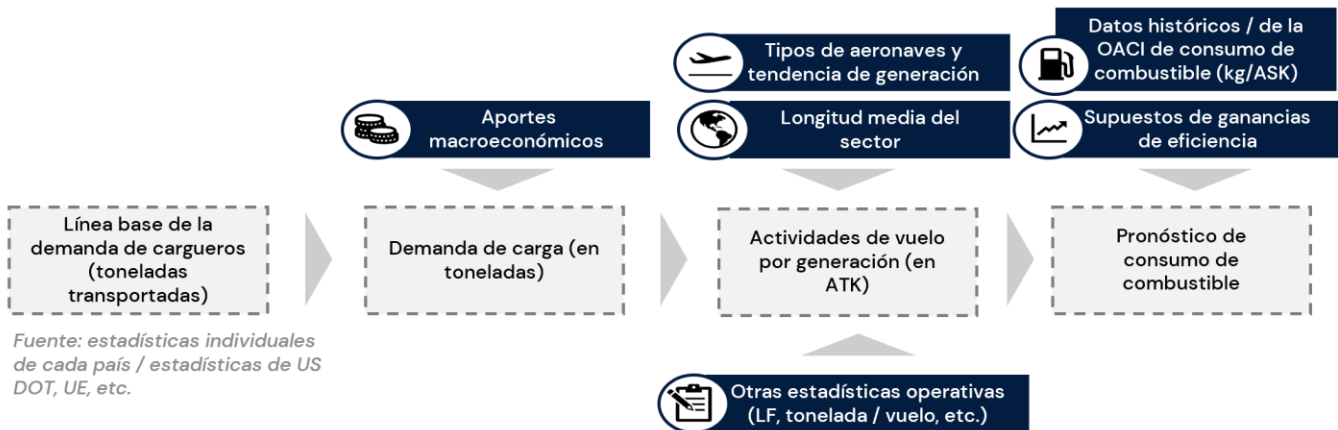


Fuente: análisis de ICF.

El pronóstico de carga (transportada en cargueros) se prepara por separado, pero de forma similar a la demanda de pasajeros. Para este pronóstico, era indispensable segmentar la actividad de carga entre la actividad de carga transportada en bodega (incluida en el pronóstico de pasajeros) y las aeronaves que solo realizan operaciones de carga.

La demanda total de cargueros (toneladas transportadas, excluidas las transportadas en bodega) es impulsada por los aportes econométricos, que luego se convierten en actividades en términos de toneladas-kilómetro disponibles (ATK) antes de multiplicarse por el combustible correspondiente consumido por ATK según el tipo de aeronave, según la base de datos de la OACI. El siguiente diagrama resume el enfoque del pronóstico de carga.

Metodología para pronosticar la actividad de carga



Fuente: estadísticas individuales de cada país / estadísticas de US DOT, UE, etc.

Fuente: análisis de ICF.

2.2.2 Alcance

El pronóstico abarca 49 países de LAC (países ALTA). Todos los modelos se han realizado sobre la base de un trayecto de ida y vuelta (es decir, considerando ambas direcciones). En lo que respecta al suministro de combustible, solo se tendrán en cuenta los vuelos de salida desde estos 49 países; el suministro de

combustible de los vuelos de llegada desde fuera de la región quedará excluido. Además, este estudio solo tiene en cuenta las actividades de pasajeros y de carga (se excluyen los vuelos en aviones ejecutivos, la aviación general, los vuelos militares y otros). Según experiencias en otros mercados, estas categorías suelen representar menos del 2 % del suministro de combustible, lo que supone una pequeña fracción del total de emisiones de carbono. No obstante, cabe destacar el mercado brasileño de aviones ejecutivos, que es el segundo más grande del mundo después del de Estados Unidos y que podría merecer una atención especial en futuros análisis más detallados. La siguiente tabla ofrece algunos ejemplos para ilustrar el alcance regional de este estudio.

Tabla15: Ilustración del alcance del estudio (ejemplos de flujos)

Ejemplo de flujo de tráfico	Tipo de mercado	Pronóstico del tráfico / la actividad	Pronóstico de suministro de combustible
Brasil-Brasil	Doméstico	Incluido	Incluido
Brasil-México	Regional	Incluido	Incluido
México-Brasil	Regional	Incluido	Incluido
Brasil-EE. UU.	Internacional	Incluido	Incluido
EE. UU.-Brasil	Internacional	Excluido	Excluido

En 2019, 352 millones de pasajeros salieron de los países ALTA. En 2024, esta cifra aumentó a más de 385 millones de pasajeros, lo que destaca el excelente desempeño de la región después del COVID. Estas cifras se calculan por pares de países y eliminan la doble contabilización de las cifras ACI de actividad regional de nivel superior. Por ejemplo, un pasajero que viaja de Brasil a México se incluye tanto en el aeropuerto de Brasil (como pasajero embarcado) como en el de México (como pasajero de llegada) para los datos de ACI. La siguiente tabla ofrece un resumen de los pasajeros y el consumo de combustible para 2024.

Tabla16: Línea base de pasajeros y combustible para 2024

Segmento	¿Está dentro del alcance?	Pasajeros (millones), 2024	Suministro de combustible (millones de toneladas), 2024
Doméstico	Incluido	251	7,9
Regional	Incluido	56	3,1
Internacional (salida)	Incluido	78,5	8,6
Internacional (llegada)	Excluido	78,5	8,6
Total	Todo	464	28,2
Total (dentro del alcance)	Incluido	385,5	19,6

2.2.3 Fuentes de datos

Para establecer la línea base y los pronósticos de la actividad / emisiones futuras, se utilizaron diversos conjuntos de datos. Estos fueron seleccionados para garantizar su solidez y comparados para garantizar su precisión y consistencia. Estas fuentes de datos se pueden segmentar en cinco categorías principales:

1. Se tuvo en cuenta la demanda **histórica** de pasajeros, ATM y tonelaje de carga, que son indicadores clave de la aviación. Estas fuentes de datos respaldaron el estudio al proporcionar una línea base sólida y una visión general de los patrones históricos de demanda en LAC.

2. Se recopilaron datos **actuales de la flota** para desglosar aún más los patrones subyacentes de demanda y oferta. Se utilizó un conjunto de programaciones publicadas y de datos de diversas agencias de aviación.
3. Los datos y supuestos **sobre la flota futura** se basaron en las perspectivas de programación más recientes publicadas por las aerolíneas y en la herramienta interna de previsión de flota de ICF. Este último recoge los libros de pedidos y las tasas de producción de los fabricantes de aeronaves (OEMs), es decir, Boeing, Airbus, etc., hasta mediados de la década de 2030. Los supuestos a largo plazo relativos a 1) los tipos de aeronaves de próxima generación se basaron en investigaciones y en los planes actuales de los OEM, y 2) las tasas de transición a los tipos de flotas futuras se basaron en las tendencias históricas del sector y en las capacidades de producción.
4. **El consumo de combustible** se calculó por tipo de aeronave utilizando las tablas más recientes disponibles de consumo de combustible de la OACI (v13.1). Las futuras ganancias de eficiencia derivadas de nuevos tipos de aeronaves y de medidas operativas se basaron en investigaciones, conversaciones con un importante OEM y miembros de ALTA.
5. Se utilizaron **supuestos econométricos** para elaborar los pronósticos del PIB a nivel de país / del PIB per cápita, que sustentan los pronósticos de demanda a largo plazo. El conjunto de datos AirportIS de IATA proporciona una base de datos global sobre los niveles de tarifas del sector que se utiliza para influir en los supuestos sobre el costo de los vuelos.

La siguiente tabla ofrece un resumen de las principales fuentes de datos utilizadas.

Tabla17: Resumen de fuentes de datos

Tema	Fuentes
Actividad histórica	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Actividad para pasajeros, los ATM y carga del Consejo Internacional de Aeropuertos (ACI) ▪ Demanda de pasajeros de IATA AirportIS ▪ Programaciones de la OAG (Guía Oficial de Aerolíneas) ▪ Los miembros de ALTA proporcionaron datos específicos de cada país. ▪ Datos de la autoridad aeronáutica (por ejemplo, T-100 de la FAA de EE. UU., otras autoridades aeronáuticas nacionales pertinentes)
Flotas actuales	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Programaciones de la OAG ▪ Datos de la autoridad aeronáutica (por ejemplo, T-100 de la FAA de EE. UU.)
Flotas futuras	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Programaciones de la OAG (corto plazo) ▪ La herramienta de pronósticos de flotas de ICF (incorpora aportes de Airbus/Boeing sobre tasas de producción y supuestos de retiro). ▪ Boeing CASCADE ▪ Investigación en la industria (varios)
Consumo de combustible / carbono	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tabla de consumo de combustible de la OACI (v13.1, agosto de 2024) ▪ Boeing CASCADE ▪ Investigación en la industria (varios)
Aportes económicos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fuentes combinadas (por ejemplo, FMI, Oxford Economics) pronósticos históricos y futuros (1996–2050) del crecimiento real del PIB. ▪ IATA AirportIS proporcionó curvas de tarifas para el precio pagado. ▪ Supuestos de IATA / ICF sobre la elasticidad de los precios y los ingresos y las tasas de madurez del mercado. ▪ Supuestos de ICF para los costos operativos de las aerolíneas

2.3 Perspectivas económicas para LAC

Esta sección resume los pronósticos de crecimiento económico para LAC. Como se describe en la sección 2.2.1, el crecimiento económico es uno de los factores claves para el aumento del transporte aéreo. ICF ha revisado las proyecciones de crecimiento económico, en particular los pronósticos del PIB, de múltiples fuentes acreditadas y ha elaborado una perspectiva consensuada y consolidada.

Se pronostica que el PIB promedio de LAC crezca a una CAGR del 2,2 % entre 2019 y 2050, impulsado por sus principales economías: Brasil, México y Argentina. Se esperan tasas de crecimiento más altas en economías más pequeñas, tales como la República Dominicana y Panamá. Las regiones vecinas, como Norteamérica, que es una de las principales fuentes de turismo receptivo para LAC, esperan un crecimiento del PIB del 1,9 % para el mismo período. La siguiente tabla resume los pronósticos del PIB para las economías claves y los países objetivos individuales.

Tabla18: Pronóstico del PIB¹¹⁶

Región / país	CAGR 2000-2019	CAGR 2019-2050	CAGR 2024-2050
Región LAC	2,3%	2,2%	2,3%
Norteamérica	2,1%	1,9%	1,9%
Mundo	2,9%	2,4%	2,4%
Argentina	1,7%	1,8%	2,3%
Bahamas	0,7%	1,2%	1,3%
Brasil	2,3%	2,0%	2,0%
Chile	3,7%	2,2%	2,3%
Colombia	3,8%	2,8%	2,8%
República Dominicana	5,1%	3,9%	3,9%
Ecuador	3,9%	1,8%	1,9%
El Salvador	2,0%	2,2%	2,1%
México	1,6%	1,7%	1,9%
Panamá	6,0%	3,1%	3,1%
Perú	4,9%	2,7%	3,0%

2.4 Actividad regional total

Esta sección proporciona los pronósticos totales de actividad regional para los 49 países de LAC. En 2019, 352 millones de pasajeros fueron transportados en vuelos dentro o de salida desde LAC, de los cuales un tercio viajó en vuelos domésticos, mientras que los vuelos intrarregionales e interregionales representaron el 14 % y el 19 %, respectivamente. Brasil, México, Colombia, Argentina y Chile fueron los cinco mercados principales de aviación en volumen de pasajeros, representan el 75 % del tráfico de salida de la región. Después del COVID, el número total de pasajeros se recuperó y superó los niveles de 2019 en un 9 % en 2024, alcanzando los 385 millones de pasajeros anuales. En 2019, la región también gestionó un total de 3,3 millones de vuelos de salida y 1,3 millones de toneladas métricas en carga dedicada.

La región se ha recuperado completamente del COVID en los tres segmentos del mercado (doméstico, intrarregional e interregional) y se espera que reanude sus tendencias de crecimiento a largo plazo, respaldadas por el crecimiento económico y turístico de cada uno de los países miembros. No obstante, se pronostica que la economía de la región crezca a una CAGR del 2,3 % entre 2025 y 2050. Esto dará lugar a que la economía de la región sea un 95 % mayor que la línea base de 2019, lo que equivale a una CAGR del 2,1 % para el periodo 2019–2050.

A largo plazo, se pronostica un crecimiento del mercado de la aviación de la región; también se pronostica que el número total de pasajeros de salida alcance los 815 millones en 2050. Esto representará un mercado de la aviación 130 % más grande que el de la línea base de 2019 y una CAGR del 2,7 %, respaldado por una

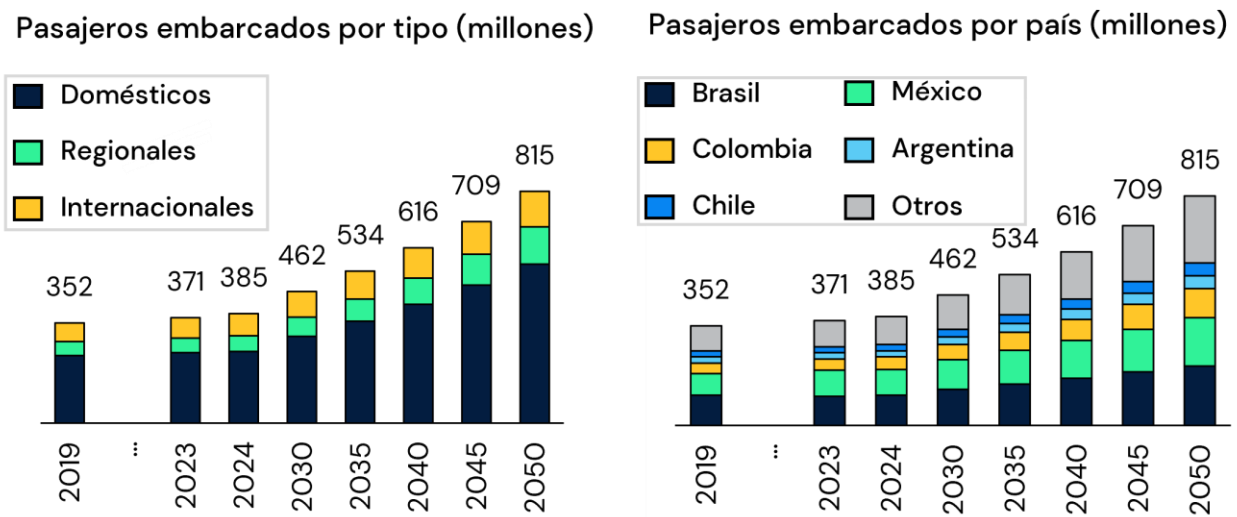
¹¹⁶ FMI, Oxford Economics, análisis de ICF.

economía en crecimiento y una población más numerosa (CAGR del +0,5 % entre 2019 y 2050). El número de viajes per cápita, un indicador que mide cuántos viajes genera cada persona, aumentará de 0,53 en 2019 a 1,07 en 2050.

Se pronostica que el tráfico doméstico crezca de 238 millones de pasajeros en 2019 a 559 millones en 2050, lo que equivale a una CAGR del 2,8 %; se pronostica que el tráfico intrarregional aumente de 50 millones de pasajeros de salida a 131 millones, lo que se traduce en una CAGR del 3,2 %, mientras que el tráfico internacional crecerá de 65 millones de pasajeros de salida en 2019 a 125 millones en 2050, lo que equivale a una CAGR del 2,1 %.

Se prevé que Brasil, México, Colombia, Argentina y Chile sigan siendo los cinco principales mercados de aviación de la región en 2050. La siguiente gráfica y la tabla resumen los resultados de los pronósticos de pasajeros para la región.

Pronóstico de la demanda de pasajeros por tipo (izq.) y mercado (der.) en LAC



Fuente: PAXIS, OAG, estadísticas nacionales, análisis de ICF.

Tabla19: Resumen de los pronósticos de tráfico de pasajeros en LAC para 2050

País objetivo	Pasajeros en 2019 (m)	Pasajeros en 2035 (m)	Pasajeros en 2050 (m)	Cuota de pasajeros en 2019	Cuota de pasajeros en 2050	CAGR 2019-2050
Brasil	106,4	146,8	210,3	30%	26%	2,2%
México	77,3	118,9	170,9	22%	21%	2,6%
Colombia	37,2	63,6	104,5	11%	13%	3,4%
Argentina	22,8	32,2	44,8	6%	5%	2,2%
Chile	20,2	30,9	46,3	6%	6%	2,7%
Perú	19,6	30,8	52,5	6%	6%	3,2%
Panamá	8,4	15,1	30,2	2%	4%	4,2%
República Dominicana	7,2	16,2	33,3	2%	4%	5,1%
Ecuador	5,0	7,8	10,5	1%	1%	2,4%
Bahamas	3,2	4,4	5,9	1%	1%	2,0%
El Salvador	2,6	4,5	7,1	1%	1%	3,3%
Otros	42,3	63,0	98,3	12%	12%	2,8%
Total ALTA	352,3	534,4	814,6	100%	100%	2,7%

Tabla20: Ilustración de la propensión para volar (ejemplo de flujos de Brasil)

Ejemplo de flujo de tráfico	Mercado	2019 Pasajeros (salidas + llegadas, m)	De los cuales se originan en Brasil*	2019 Población (m)	2019 viaje/per cápita
Brasil-Brasil	Doméstico	94,9	94,9	207	0,46
Brasil-EE. UU.	Internacional	4,6	3,3	207	0,02
Brasil-Argentina	Regional	3,8	1,6	207	0,01.
...
Total Brasil		118	108	207	0,52

*El primer trayecto sale de Brasil (no se tiene en cuenta a los pasajeros con residencia en los Estados Unidos que tomen un vuelo de ida y vuelta de Brasil a Estados Unidos).

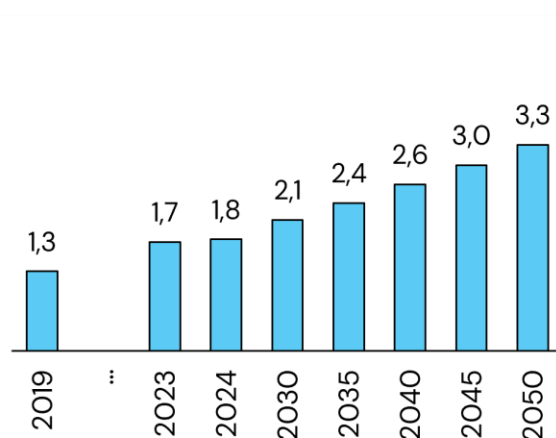
Tabla21: Propensión para volar en LAC, 2019 (histórico) y 2050 (pronóstico)

País objetivo	2019 Viajes domésticos /per cápita	2019 Viajes intl. /per cápita	2019 Total viajes/per cápita	2050 Viajes domésticos/p er cápita	2050 Viajes intl. /per cápita	2050 Total viajes/per cápita
Brasil	0,46	0,06	0,52	0,89	0,09	0,98
México	0,43	0,11	0,54	0,81	0,22	1,03
Colombia	0,60	0,15	0,75	1,51	0,26	1,77
Argentina	0,36	0,16	0,51	0,73	0,21	0,93
Chile	0,77	0,30	1,07	1,81	0,44	2,25
Perú	0,43	0,17	0,59	1,08	0,20	1,28
Panamá	0,10	1,88	1,97	0,22	5,19	5,41
República Dominicana	0,01	0,46	0,46	0,02	2,12	2,14
Ecuador	0,16	0,13	0,29	0,34	0,15	0,49
Bahamas	2,97	3,01	5,97	4,09	6,11	10,21
El Salvador	n/a	0,36	0,36	n/a	0,94	0,94
Otros	0,08	0,23	0,32	0,19	0,41	0,61
Media ALTA	0,37	0,16	0,53	0,76	0,31	1,07

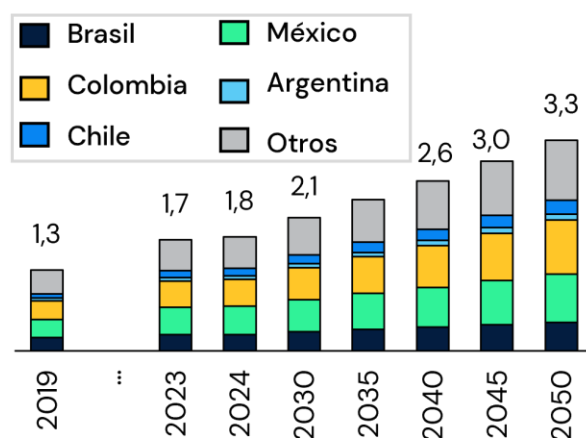
Se pronostica que los ATM y la carga aumenten hasta alcanzar los 5,9 millones de vuelos de salida y los 3,3 millones de toneladas métricas de carga dedicada, lo que representa una CAGR del 1,9 % y del 3,1%, respectivamente. Los cinco principales mercados de aviación representarán el 64 % de los ATM de salida de la región. El pronóstico de una tasa de crecimiento inferior para los ATM en comparación con la demanda de pasajeros destaca el aumento continuado en el tamaño de las aeronaves que se observa en el sector. Las siguientes gráficas resumen los resultados de los pronósticos de carga y de los ATM para los países objetivos, así como para toda la región.

Pronóstico de la demanda de carga por total (izq.) y mercado (der.) en LAC

Carga embarcada, sin la transportada en bodega (millones de toneladas)



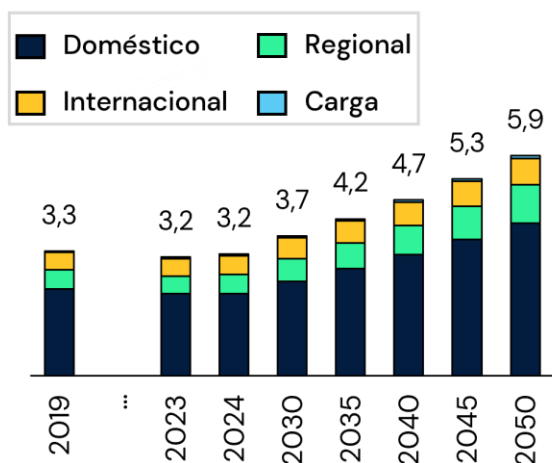
Carga embarcada, sin la transportada en bodega, por país (millones de toneladas)



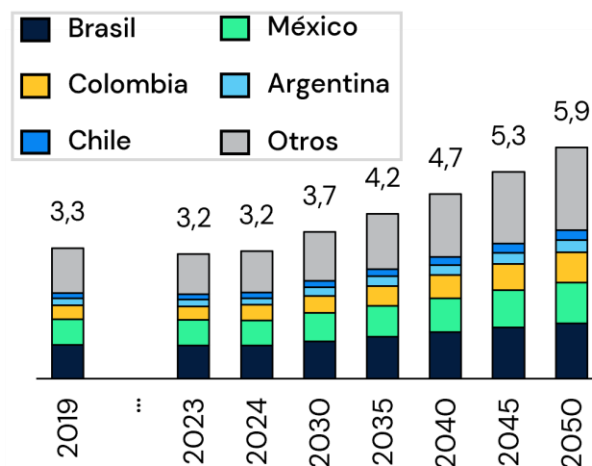
Fuente: PAXIS, OAG, estadísticas nacionales, análisis de ICF.

ATM embarcados por tipo (izq.) y mercado (der.)

ATM embarcados por tipo (millones)



ATM embarcados por país (millones)



Fuente: PAXIS, OAG, estadísticas nacionales, análisis de ICF.
ATM = movimientos de transporte aéreo.

Tabla22 Resumen del pronóstico de carga y actividad de ALTA

País objetivo	Carga en 2019 (en miles de toneladas)	Carga en 2050 (en miles de toneladas)	CAGR de carga en 2019-2050	ATM en 2019 (en miles)	ATM en 2050 (en miles)	CAGR de los ATM EN 2019-2050
Brasil	209	446	2,5%	868	1,411	1,6%
México	281	755	3,2%	651	1,041	1,5%
Colombia	294	836	3,4%	348	769	2,6%
Argentina	40	93	2,8%	185	307	1,7%
Chile	68	217	3,8%	136	247	2,0%
Perú	52	122	2,8%	159	314	2,2%
Panamá	41	126	3,7%	78	210	3,3%
República Dominicana	40	111	3,4%	50	200	4,5%
Ecuador	89	254	3,5%	53	76	1,2%
Bahamas	0,4	1,8	5,1%	70	64	-0,3%*
El Salvador	8	20	2,9%	23	45	2,2%
Otros	142	303	2,5%	704	1,189	1,7%
Total ALTA	1,264	3,283	3,1%	3,323	5,874	1,9%

*Crecimiento negativo en Bahamas debido a la reducción del número de ATM registrado en 2024 frente a 2019 (-15 %).

2.5 Pronósticos a nivel de país

Esta subsección ofrece un análisis detallado de los pronósticos de la actividad y del combustible para cada uno de los países objetivos evaluados en LAC, que incluyen Argentina, Brasil, Chile, Colombia, República Dominicana, Ecuador, El Salvador, México, Panamá, Perú y Bahamas.

2.5.1 Argentina

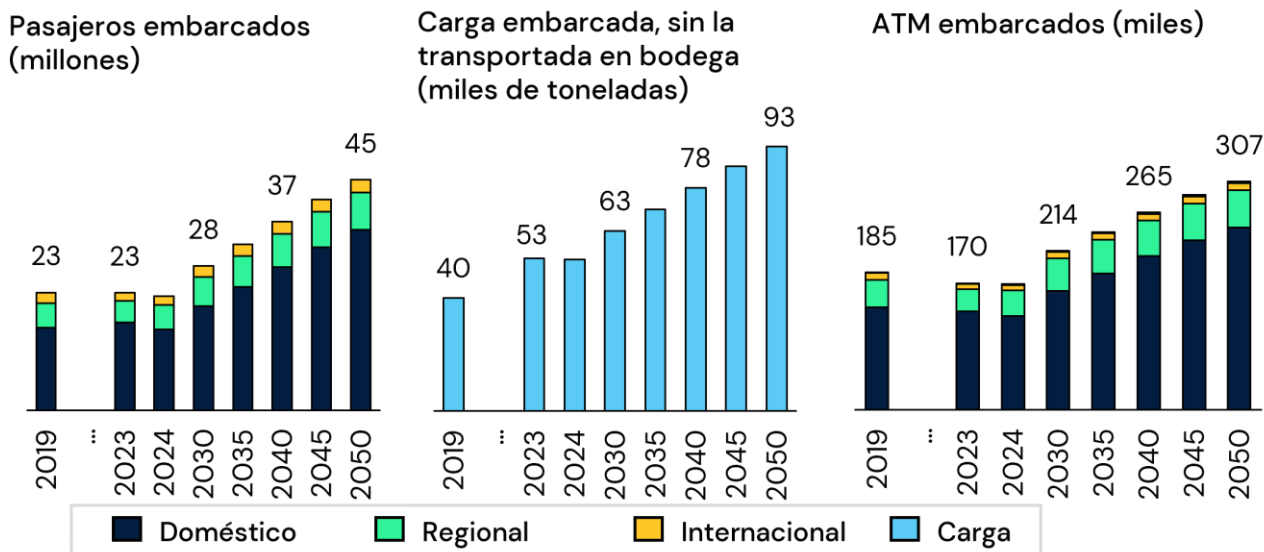
En 2019, Argentina gestionó 184 000 vuelos de salida y 40 000 toneladas de carga dedicada. 23 millones de pasajeros fueron transportados en vuelos domésticos o de salida desde Argentina, lo que sitúa al país como el cuarto mercado aeronáutico más grande de LAC en volumen de pasajeros¹¹⁷. El mercado doméstico representó 16 millones de pasajeros, lo que equivale al 70 % de la demanda, mientras que los pasajeros intrarregionales e internacionales representaron 4,8 millones y 2,1 millones de pasajeros, respectivamente. Después del COVID, el número total de pasajeros se recuperó hasta alcanzar el 97 % de los niveles de 2019 en 2024.

Se proyecta que el mercado aeronáutico argentino complete su recuperación tras el COVID y retome las tendencias de crecimiento a largo plazo, respaldado por el crecimiento económico continuo del país y el aumento del turismo receptivo. Se pronostica que, en el período comprendido entre 2025 y 2050, la economía argentina crezca a una CAGR del 2,3 %. Esto dará lugar a una economía un 74 % mayor que la línea base de 2019, lo que equivale a una CAGR del 1,8 % para el periodo 2019–2050.

A largo plazo, se pronostica que el mercado de la aviación en Argentina madure gradualmente y que la demanda total de pasajeros crezca hasta alcanzar los 45 millones en 2050. Esto representará un mercado de la aviación 96 % más grande que el de la línea base de 2019 y una CAGR del 2,2 %.

Se pronostica que los ATM y la carga aumenten hasta alcanzar los 307 000 vuelos de salida y las 93 000 toneladas de carga dedicada, lo que representa una tasa CAGR del 1,7 % y del 2,7 %, respectivamente. La siguiente gráfica resume los resultados de los pronósticos para Argentina.

Pronóstico de la demanda y la actividad en Argentina



Fuente: PAXIS, OAG, estadísticas nacionales, análisis de ICF.

2.5.2 Bahamas

En 2019, Bahamas gestionó 70 000 vuelos de salida y 400 toneladas de carga dedicada. 3,2 millones de pasajeros fueron transportados en vuelos domésticos o de salida desde Bahamas, lo que sitúa al país en el decimocuarto puesto del ranking de mercados aeronáuticos de LAC por volumen de pasajeros¹¹⁷. El mercado doméstico representó 1,2 millones de pasajeros, lo que equivale al 37 % de la demanda, mientras que los

¹¹⁷ Volúmenes de pasajeros de salida considerados

pasajeros intrarregionales e internacionales representaron 119 000 y 1,9 millones de pasajeros, respectivamente. Después del COVID, el número total de pasajeros se recuperó y superó los niveles de 2019 en un 11 % en 2024.

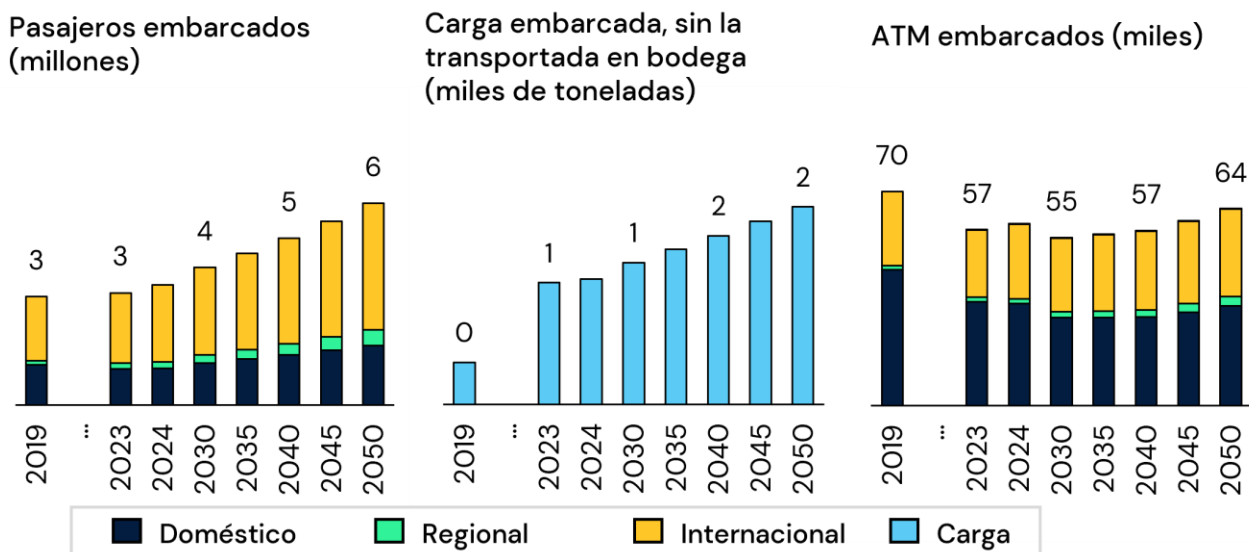
El mercado de la aviación de Bahamas se ha recuperado por completo y ha retomado sus tendencias de crecimiento a largo plazo, respaldado por el crecimiento económico continuo del país, lo que se traduce en una mayor demanda entre islas y un crecimiento constante del turismo receptivo proveniente de Norteamérica y Europa. Se pronostica que la economía de Bahamas crezca a una CAGR del 1,3 % entre 2025 y 2050. Esto dará lugar a una economía un 44 % más grande que la de la línea base de 2019, lo que equivale a una CAGR del 1,2 % para el periodo 2019-2050.

A largo plazo, se pronostica que el mercado de la aviación de Bahamas alcance una demanda total de pasajeros de 5,9 millones en 2050. Esto representará un mercado de la aviación 86 % más grande que el de la línea base de 2019 y una CAGR del 2,0 %.

Se pronostica que los ATM alcancen los 64 000 vuelos de salida, lo que representa una disminución del 0,3 % en la CAGR en comparación con el nivel de 2019. Esto está impulsado por la suma de un menor nivel de actividad en 2025 (solo 55 000 vuelos de salida registrados a través de la OAG), con un lento crecimiento de la demanda y la continua tendencia al aumento del tamaño de las aeronaves que se observa en todo el sector.

Se pronostica que la carga aumente hasta alcanzar las 2000 toneladas de carga dedicada, lo que representa una CAGR del 5,1 %. La siguiente gráfica resume los resultados de los pronósticos para Bahamas.

Pronóstico de la demanda y la actividad en Las Bahamas



Fuente: PAXIS, OAG, estadísticas nacionales, análisis de ICF.

2.5.3 Brasil

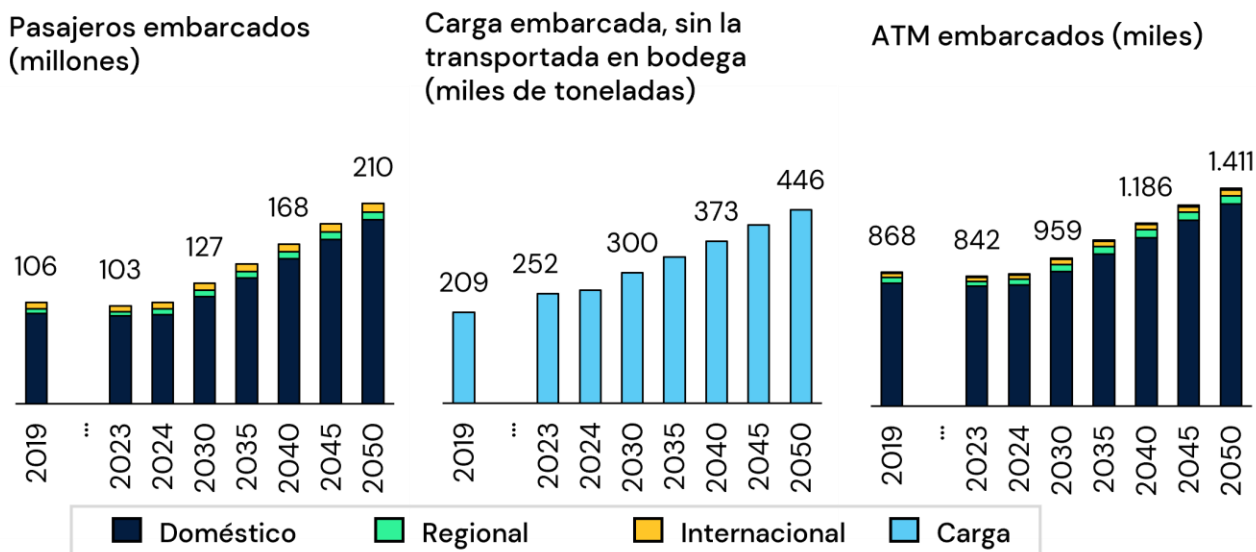
En 2019, Brasil gestionó 868 000 vuelos de salida y 209 000 toneladas de carga dedicada. 106 millones de pasajeros fueron transportados en vuelos domésticos o de salida desde Brasil, lo que convierte al país en el mayor mercado de aviación de LAC en volumen de pasajeros¹¹⁷. El mercado doméstico representó 95 millones de pasajeros, lo que equivale al 89 % de la demanda, mientras que los pasajeros intrarregionales e internacionales representaron 4,9 millones y 6,6 millones de pasajeros, respectivamente. Después del COVID, el número total de pasajeros se recuperó hasta alcanzar el 100 % de los niveles de 2019 en 2024.

El mercado de la aviación brasileño ha retomado su tendencia de crecimiento a largo plazo, respaldado por el crecimiento económico continuo del país y los lazos más cercanos con otros países de la región. Como la mayor economía de la región, se pronostica que la economía de Brasil crezca a una CAGR del 2,0 % entre 2025 y 2050. Esto dará lugar a una economía un 87 % más grande que la de la línea base de 2019, lo que equivale a una CAGR del 2,0 % para el período 2019–2050.

A largo plazo, se pronostica que el mercado de la aviación brasileño siga madurando y que la demanda total de pasajeros crezca hasta alcanzar los 210 millones en 2050. Esto representará un mercado de la aviación 98 % más grande que el de la línea base de 2019 y una CAGR del 2,2 %.

Se pronostica que los ATM y la carga aumenten hasta alcanzar 1,4 millones de vuelos de salida y las 446 000 toneladas de carga dedicada, lo que representa una CAGR del 1,6 % y del 2,5 %, respectivamente. La siguiente gráfica resume los resultados de los pronósticos para Brasil.

Pronóstico de la demanda y la actividad en Brasil



Fuente: PAXIS, OAG, estadísticas nacionales, análisis de ICF.

2.5.4 Chile

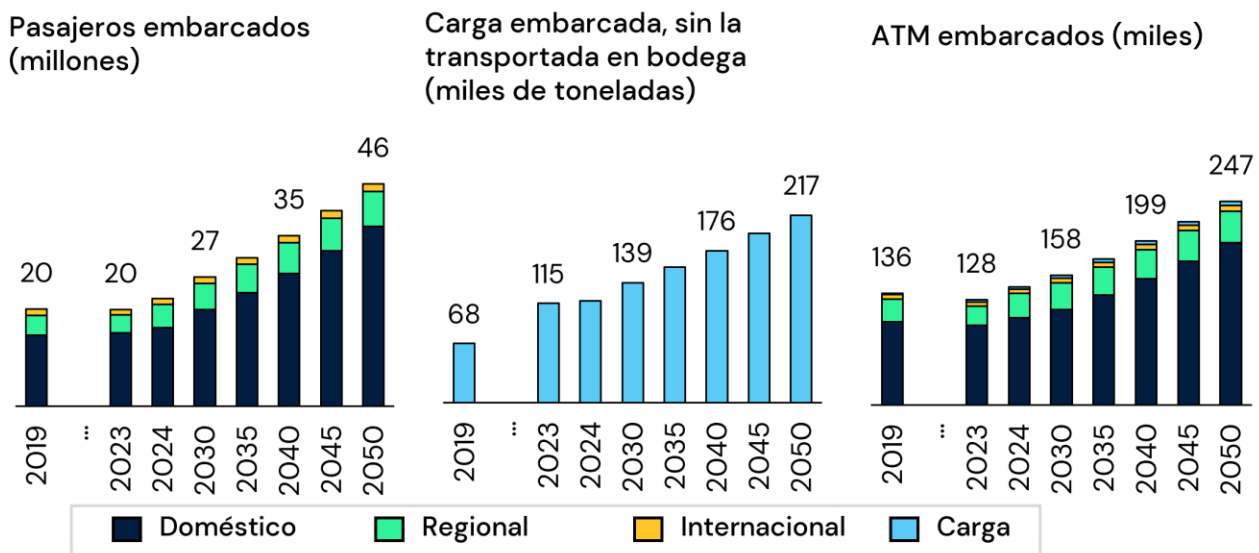
En 2019, Chile gestionó 136 000 vuelos de salida y 68 000 toneladas de carga dedicada. 20 millones de pasajeros fueron transportados en vuelos domésticos o de salida desde Chile, lo que sitúa al país en el quinto puesto del ranking de mercados de aviación de LAC por volumen de pasajeros¹¹⁷. El mercado doméstico representó 15 millones de pasajeros, lo que equivale al 73 % de la demanda, mientras que los pasajeros intrarregionales e internacionales representaron 4,1 millones y 1,3 millones de pasajeros, respectivamente. Después del COVID, el número total de pasajeros se recuperó hasta alcanzar el 111 % de los niveles de 2019 en 2024.

El mercado de la aviación chilena se ha recuperado por completo y ha retomado sus tendencias de crecimiento a largo plazo, respaldado por el crecimiento económico continuo del país y de toda la región. Se pronostica que la economía chilena crezca a una CAGR del 2,3 % en el período 2025–2050. Esto dará lugar a una economía un 96 % más grande que la de la línea base de 2019, lo que equivale a una CAGR del 2,2 % para el periodo 2019–2050.

A largo plazo, se pronostica que el mercado de la aviación chilena crezca y madure, y que la demanda total de pasajeros alcance los 46 millones en 2050. Esto representará un mercado de la aviación 129 % más grande que el de la línea base de 2019 y una CAGR del 2,7 %.

Se pronostica que los ATM y la carga aumenten hasta alcanzar los 247 000 vuelos de salida y las 217 000 toneladas de carga dedicada, lo que representa una CAGR del 2,0 % y del 3,8 %, respectivamente. La siguiente gráfica resume los resultados de los pronósticos para Chile.

Pronóstico de la demanda y la actividad en Chile



Fuente: PAXIS, OAG, estadísticas nacionales, análisis de ICF.

2.5.5 Colombia

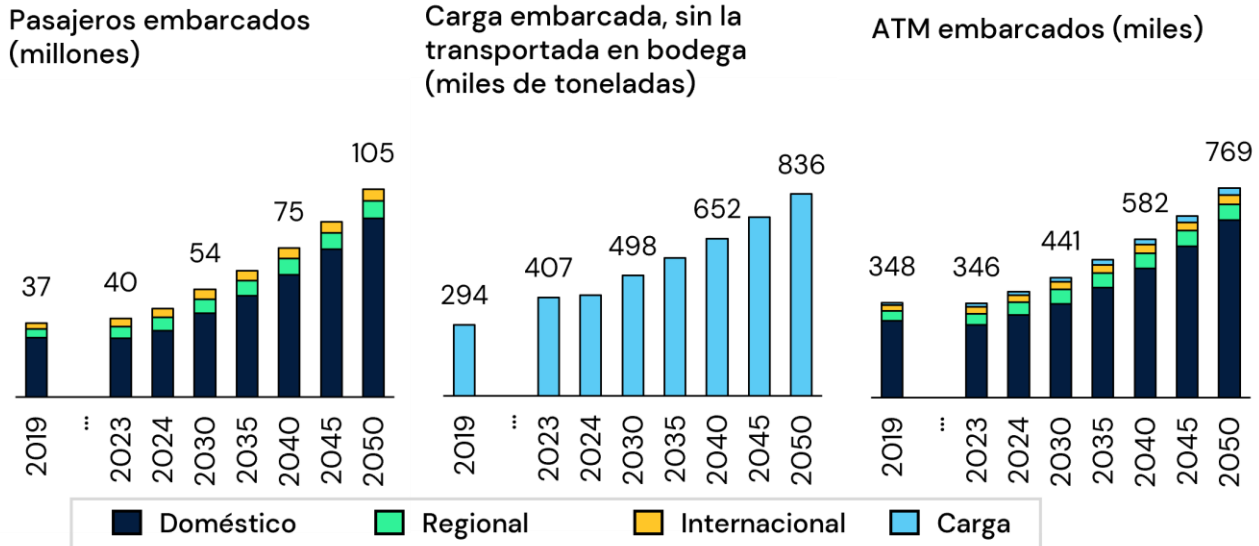
En 2019, Colombia gestionó 348 000 vuelos de salida y 294 000 toneladas de carga dedicada. 37 millones de pasajeros fueron transportados en vuelos domésticos o de salida desde Colombia, lo que sitúa al país como el tercer mercado de aviación más grande de LAC en volumen de pasajeros¹¹⁷. El mercado doméstico representó 30 millones de pasajeros, lo que equivale al 80 % de la demanda, mientras que los pasajeros intrarregionales e internacionales representaron 4,3 millones y 3,0 millones de pasajeros, respectivamente. Después del COVID, el número total de pasajeros se recuperó y superó los niveles de 2019 en un 20 % en 2024.

El mercado de la aviación de Colombia se ha recuperado por completo y ha retomado sus tendencias de crecimiento a largo plazo, respaldado por el crecimiento económico continuo del país y de toda la región. Se pronostica que la economía de Colombia crezca a una CAGR del 2,8 % en el período 2025–2050. Esto dará lugar a una economía que será 132 % más grande que la de la línea base de 2019, lo que equivale a una CAGR del 2,7 % para el periodo 2019–2050.

A largo plazo, se pronostica que el mercado de la aviación en Colombia crezca y madure gradualmente. La demanda total de pasajeros crecerá hasta alcanzar los 105 millones en 2050. Esto representará un mercado de la aviación 181 % más grande que el de la línea base de 2019 y una CAGR del 3,4 %.

Se pronostica que los ATM y la carga aumenten hasta alcanzar los 769 000 vuelos de salida y las 836 000 toneladas de carga dedicada, lo que representa una CAGR del 2,6 % y del 3,4 %, respectivamente. La siguiente gráfica resume los resultados de la previsión para Colombia.

Pronóstico de la demanda y la actividad en Colombia



Fuente: PAXIS, OAG, estadísticas nacionales, análisis de ICF.

2.5.6 República Dominicana

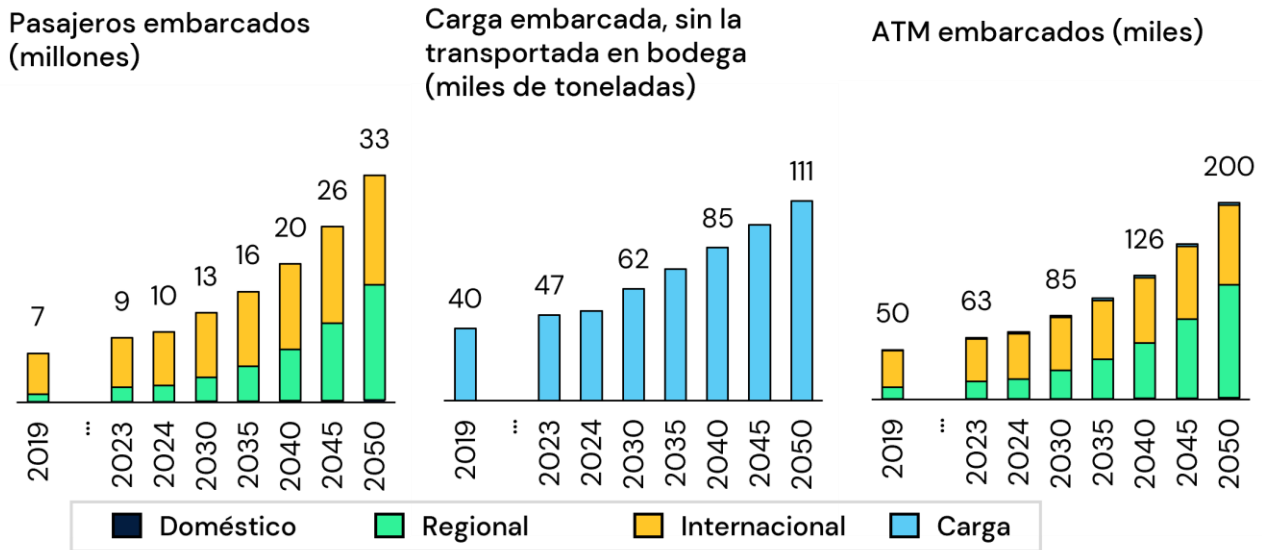
En 2019, República Dominicana gestionó 50 000 vuelos de salida y 40 000 toneladas de carga dedicada. 7 millones de pasajeros fueron transportados en vuelos domésticos o de salida desde República Dominicana, lo que sitúa al país en el octavo puesto del ranking de mercados aeronáuticos de LAC por volumen de pasajeros¹⁷. El mercado doméstico es insignificante, con solo 58 000 pasajeros (lo que equivale al 1 % de la demanda), mientras que los pasajeros intrarregionales e internacionales suman 1,1 millones y 6,0 millones, respectivamente. Después del COVID, el número total de pasajeros se recuperó y superó los niveles de 2019 en un 43 % en 2024.

El mercado de la aviación de República Dominicana se ha recuperado con fuerza y ha retomado sus tendencias de crecimiento a largo plazo, respaldado por la creciente demanda de viajes de ocio, especialmente procedente de Estados Unidos y Canadá. Se pronostica que, en el período comprendido entre 2025 y 2050, la economía de República Dominicana crezca a una CAGR del 3,9 %. Esto dará lugar a una economía un 223 % más grande que la de la línea base de 2019, lo que equivale a una CAGR del 3,7 % para el periodo 2019–2050. También se pronostica que los principales mercados emisores de regiones como Estados Unidos registren un crecimiento del PIB del 1,9 % durante el mismo periodo.

A largo plazo, se pronostica que el mercado de la aviación de República Dominicana siga creciendo e ICF pronostica que la demanda total de pasajeros aumentará hasta alcanzar los 33 millones en 2050. Esto representará un mercado de la aviación 364 % más grande que el de la línea base de 2019 y una CAGR del 5,1 %.

Se pronostica que los ATM y la carga aumenten hasta alcanzar los 200 000 vuelos de salida y las 111 000 toneladas de carga dedicada, lo que representa una CAGR del 4,5 % y del 3,4 %, respectivamente. La siguiente gráfica resume los resultados de los pronósticos para República Dominicana.

Pronóstico de la demanda y la actividad en la República Dominicana



Fuente: PAXIS, OAG, estadísticas nacionales, análisis de ICF.

2.5.7 Ecuador

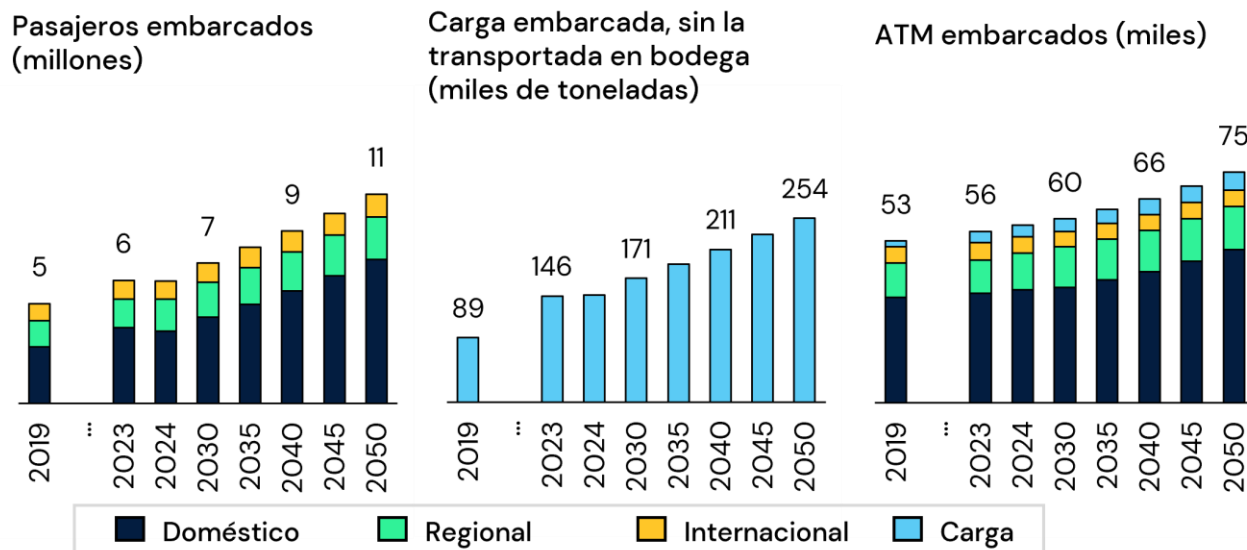
En 2019, Ecuador gestionó 53 000 vuelos de salida y 89 000 toneladas de carga dedicada. 5 millones de pasajeros fueron transportados en vuelos domésticos o de salida desde Ecuador, lo que sitúa al país en el décimo puesto del ranking de mercados aeronáuticos de LAC por volumen de pasajeros¹⁷. El mercado doméstico representó 2,8 millones de pasajeros, lo que equivale al 56 % de la demanda, mientras que los pasajeros intrarregionales e internacionales representaron 1,3 millones y 868 000 pasajeros, respectivamente. Después del COVID, el número total de pasajeros se recuperó y superó los niveles de 2019 en un 22 % en 2024.

El mercado aeronáutico de Ecuador se ha recuperado por completo y ha retomado sus tendencias de crecimiento a largo plazo, respaldado por el crecimiento económico continuo del país y de toda la región. Se pronostica que la economía de Ecuador crezca a una CAGR del 1,9 % entre 2025 y 2050. Esto dará lugar a una economía un 75 % más grande que la de la línea base de 2019, lo que equivale a una CAGR del 1,8 % para el periodo 2019–2050.

A largo plazo, se pronostica que el mercado de la aviación de Ecuador crezca y se espera que la demanda total de pasajeros alcance los 11 millones en 2050. Esto representará un mercado de la aviación 110 % más grande que el de la línea base de 2019 y una CAGR del 2,4 %.

Se pronostica que los ATM y la carga aumenten hasta alcanzar los 76 000 vuelos de salida y las 254 000 toneladas de carga dedicada, lo que representa una CAGR del 1,2 % y del 3,5 %, respectivamente. La siguiente gráfica resume los resultados de los pronósticos para Ecuador.

Pronóstico de la demanda y la actividad en Ecuador



Fuente: PAXIS, OAG, estadísticas nacionales, análisis de ICF.

2.5.8 El Salvador

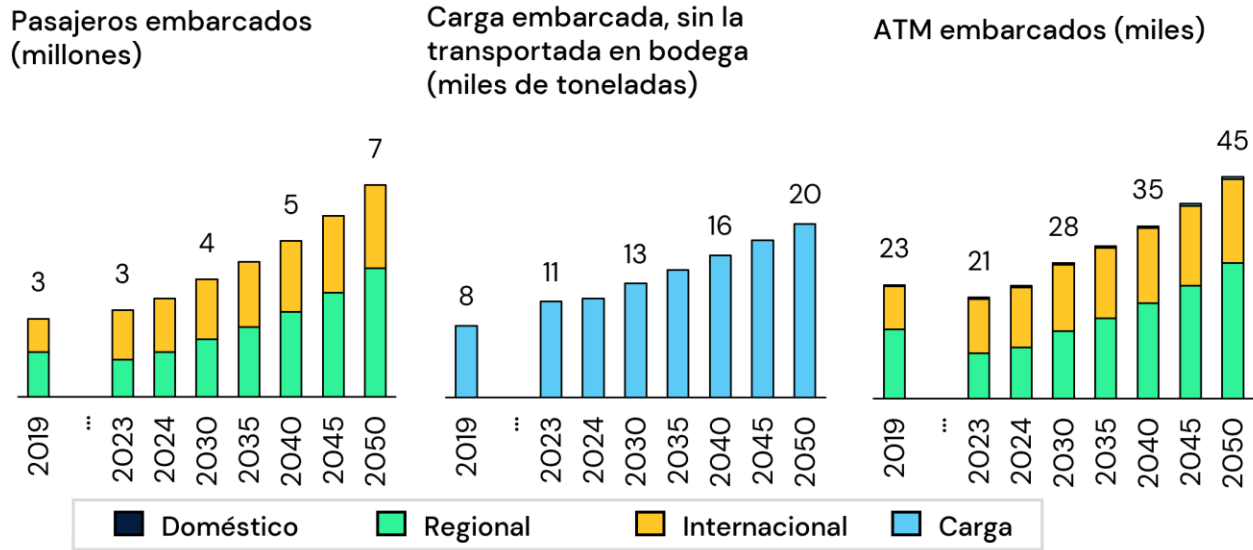
En 2019, El Salvador gestionó 23 000 vuelos de salida y 8000 toneladas de carga dedicada. 2,6 millones de pasajeros fueron transportados en vuelos de salida desde El Salvador, lo que sitúa al país en el puesto 16 entre los mercados de aviación más grandes de LAC en volumen de pasajeros¹¹⁷. Actualmente no existe mercado doméstico, mientras que los pasajeros intrarregionales e internacionales representaron 1,5 millones y 1,1 millones de pasajeros, respectivamente. Después del COVID, el número total de pasajeros se recuperó y superó los niveles de 2019 en un 26 % en 2024.

El mercado de la aviación de El Salvador se ha recuperado por completo y ha retomado sus tendencias de crecimiento a largo plazo, respaldado por el crecimiento económico continuo del país y de toda la región. Se pronostica que la economía de El Salvador crezca a una CAGR del 2,1 % entre 2025 y 2050. Esto dará lugar a una economía un 95 % más grande que la de la línea base de 2019, lo que equivale a una CAGR del 2,2 % para el periodo 2019–2050.

A largo plazo, se pronostica que el mercado de la aviación de El Salvador crezca y se espera que la demanda total de pasajeros alcance los 7,1 millones en 2050. Esto representará un mercado de la aviación 171 % más grande que el de la línea base de 2019 y una CAGR del 3,3 %.

Se pronostica que los ATM y la carga aumenten hasta alcanzar los 45 000 vuelos de salida y las 20 000 toneladas de carga dedicada, lo que representa una CAGR del 2,2 % y del 2,9 %, respectivamente. La siguiente gráfica resume los resultados de los pronósticos para El Salvador.

Pronóstico de la demanda y la actividad en El Salvador



Fuente: PAXIS, OAG, estadísticas nacionales, análisis de ICF.

2.5.9 México

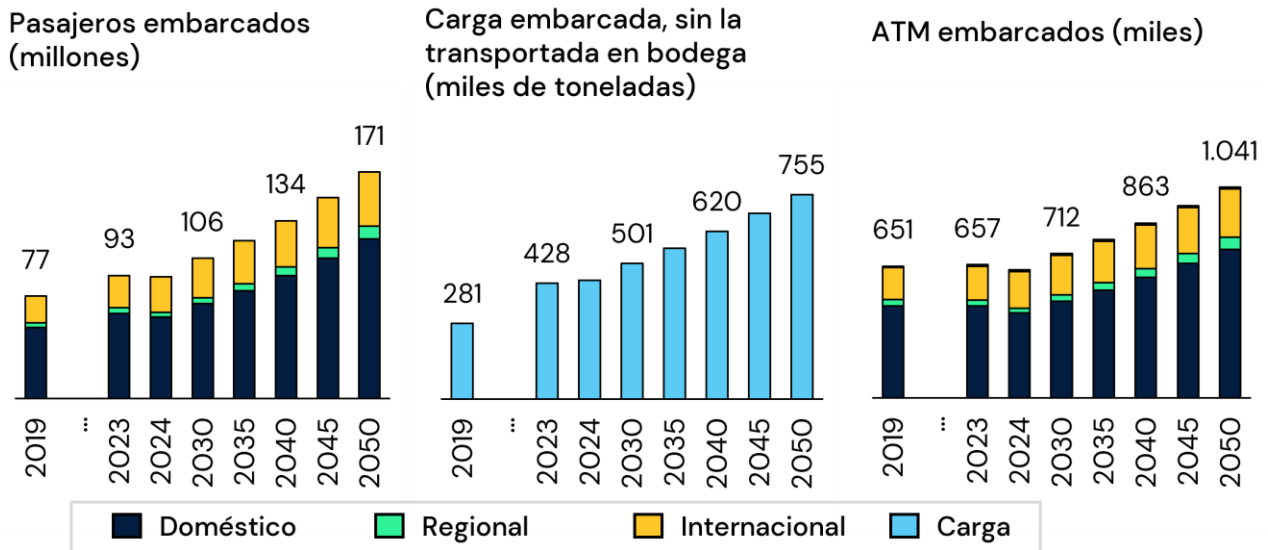
En 2019, México gestionó 651 000 vuelos de salida y 281 000 toneladas de carga dedicada. 77 millones de pasajeros fueron transportados en vuelos domésticos o de salida desde México, lo que sitúa al país como el segundo mercado de aviación más grande de LAC en volumen de pasajeros¹⁷. El mercado doméstico representó 54 millones de pasajeros, lo que equivale al 70 % de la demanda, mientras que los pasajeros intrarregionales e internacionales representaron 3,7 millones y 20 millones de pasajeros, respectivamente. Después del COVID, el número total de pasajeros se recuperó y superó los niveles de 2019 en un 19 % en 2024.

El mercado de la aviación en México se ha recuperado por completo y ha retomado sus tendencias de crecimiento a largo plazo, respaldado por el crecimiento económico continuo del país y el turismo receptivo proveniente de Norteamérica y Europa. Se pronostica que la economía de México crezca a una CAGR del 1,9 % en el período 2025–2050. Esto dará lugar a una economía un 68 % más grande que la de la línea base de 2019, lo que equivale a una CAGR del 1,7 % para el periodo 2019–2050.

A largo plazo, se pronostica que el mercado de la aviación en México crezca y madure aún más, e ICF pronostica que la demanda total de pasajeros alcanzará los 171 millones en 2050. Esto representará un mercado de la aviación 121 % más grande que el de la línea base de 2019 y una CAGR del 2,6 %.

Se proyecta que los ATM y la carga aumenten hasta alcanzar un millón de vuelos de salida y las 755 000 toneladas de carga dedicada, lo que representa una CAGR del 1,5 % y del 3,2 %, respectivamente. La siguiente gráfica resume los resultados de los pronósticos para México.

Pronóstico de la demanda y la actividad en México



Fuente: PAXIS, OAG, estadísticas nacionales, análisis de ICF.

2.5.10 Panamá

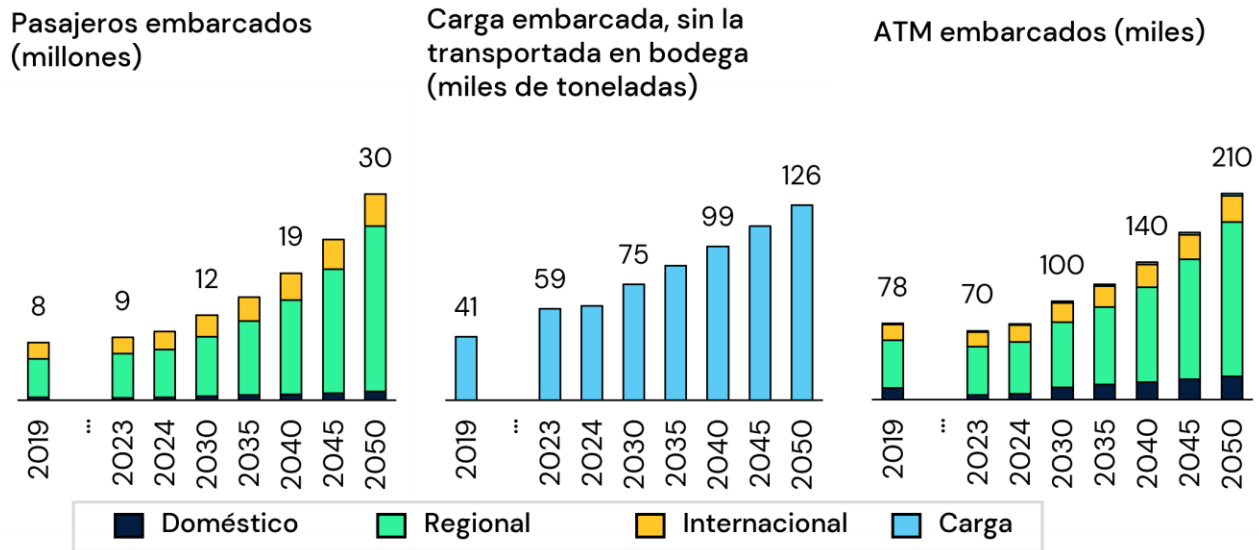
En 2019, Panamá gestionó 78 000 vuelos de salida y 41 000 toneladas de carga dedicada. 8,4 millones de pasajeros fueron transportados en vuelos de salida desde Panamá, lo que sitúa al país en el séptimo puesto del ranking de mercados aeronáuticos de LAC por volumen de pasajeros¹¹⁷. El mercado doméstico representó solo 405 000 pasajeros, lo que equivale al 5 % de la demanda, mientras que los pasajeros intrarregionales e internacionales representaron 5,7 millones y 2,4 millones de pasajeros, respectivamente. Después del COVID, el número total de pasajeros se recuperó y superó los niveles de 2019 en un 19 % en 2024.

El mercado de la aviación de Panamá se ha recuperado por completo y ha retomado sus tendencias de crecimiento a largo plazo, respaldado por el crecimiento económico continuo del país y la estrategia de la aerolínea nacional de convertir el aeropuerto en un *hub* de conexiones. Se pronostica que la economía de Panamá crezca a una CAGR del 3,1 % entre 2025 y 2050. Esto dará lugar a una economía un 156 % más grande que la de la línea base de 2019, lo que equivale a una CAGR del 3,1 % para el periodo 2019–2050.

A largo plazo, se pronostica que el mercado de la aviación de Panamá crezca y que la demanda total de pasajeros alcance los 30 millones en 2050. Esto representará un mercado de la aviación 259 % más grande que el de la línea base de 2019 y una CAGR del 4,2 %.

Se pronostica que los ATM y la carga aumenten hasta alcanzar los 210 000 vuelos de salida y las 126 000 toneladas de carga dedicada, lo que representa una CAGR del 3,3 % y del 3,7 %, respectivamente. La siguiente gráfica resume los resultados de los pronósticos para Panamá.

Pronóstico de la demanda y la actividad en Panamá



Fuente: PAXIS, OAG, estadísticas nacionales, análisis de ICF.

2.5.11 Perú

En 2019, Perú gestionó 159 000 vuelos de salida y 52 000 toneladas de carga dedicada. 20 millones de pasajeros fueron transportados en vuelos domésticos o de salida desde Perú, lo que sitúa al país como el sexto mercado aeronáutico más grande de LAC en volumen de pasajeros¹¹⁷. El mercado doméstico representó 14 millones de pasajeros, lo que equivale al 70 % de la demanda, mientras que los pasajeros intrarregionales e internacionales representaron 4,3 millones y 1,5 millones de pasajeros, respectivamente. Después del COVID, el número total de pasajeros se recuperó y superó los niveles de 2019 en un 5 % en 2024.

El mercado de la aviación peruano se ha recuperado por completo y ha retomado sus tendencias de crecimiento a largo plazo, respaldado por el crecimiento económico continuo del país y la creciente demanda turística. Se pronostica que la economía del Perú crezca a una CAGR del 3,0 % en el período 2025–2050. Esto dará lugar a una economía un 130 % más grande que la de la línea base de 2019, lo que equivale a una CAGR del 2,7 % para el periodo 2019–2050.

A largo plazo, se pronostica que el mercado de la aviación en Perú crezca y madure, e ICF proyecta que la demanda total de pasajeros alcanzará los 52 millones en 2050. Esto representará un mercado de la aviación 167 % más grande que el de la línea base de 2019 y una CAGR del 3,2 %.

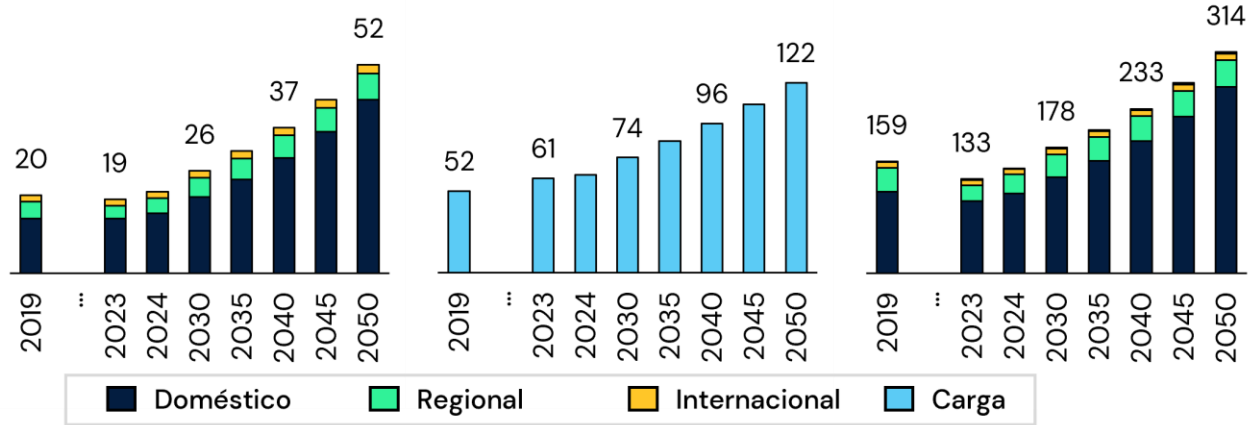
Se pronostica que los ATM y la carga aumenten hasta alcanzar los 314 000 vuelos de salida y las 122 000 toneladas de carga dedicada, lo que representa una CAGR del 2,2 % y del 2,8 %, respectivamente. La siguiente gráfica resume los resultados de los pronósticos para Perú.

Pronóstico de la demanda y la actividad en Perú

Pasajeros embarcados
(millones)

Carga embarcada, sin la
transportada en bodega
(miles de toneladas)

ATM embarcados (miles)



Fuente: PAXIS, OAG, estadísticas nacionales, análisis de ICF.

3 El papel de la renovación de flota



3.1 Modernización y reemplazo de flota

En esta sección se analiza la naturaleza de la flota de aeronaves que opera en LAC. Pronostica cómo cambiará la flota con el tiempo para llegar a los objetivos de crecimiento, económicos y medioambientales, y cómo esto influirá en el total del suministro de combustible de aviación en la región.

Resultado claves: Contribución de la renovación de flota

- En 2024, el 38 % de los ASK que partieron de LAC fueron operados por aeronaves de nueva generación, frente al 11 % en 2019, lo que la convierte en una de las principales regiones por cuota de los ASK operados por aeronaves de nueva generación.
- El despliegue acelerado de aeronaves de última generación representa una ruta fundamental para mejorar la eficiencia del combustible y reducir las emisiones en todo el sector. Sin embargo, para lograr estos beneficios medioambientales, las aerolíneas deben realizar importantes inversiones de capital, compromisos que las compañías aéreas de LAC ya han asumido mediante importantes programas de renovación de flotas y otros compromisos.
- Se pronostica que las aeronaves de próxima generación (con combustible convencional) se incorporen a la flota regional a partir de la segunda mitad de la década de 2030, comenzando por los turbohélices y seguidos por los *jets* regionales y los de fuselaje estrecho (*narrowbody*) hacia finales de la década.
- Para 2050, se pronostica que alrededor del 35 % de los ASK de salida de LAC serán operados por aeronaves de futura generación (con combustible convencional), mientras que el 65 % restante será operado por aeronaves de nueva generación.
- Se prevé que la renovación de flota y las correspondientes mejoras en la eficiencia del combustible contribuyan a una reducción de aproximadamente el 30 % en el consumo total de combustible anual para 2050, lo que a su vez reducirá las emisiones.

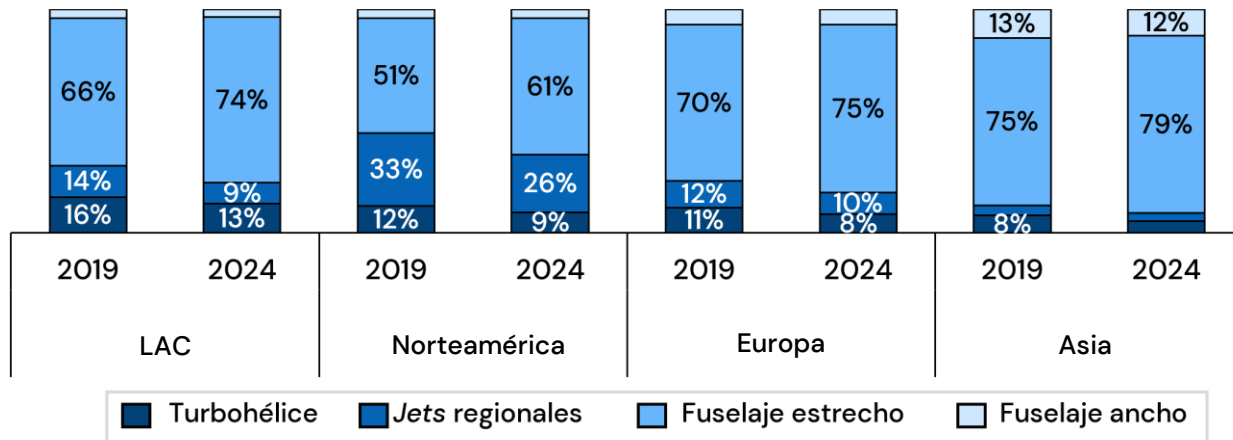
3.1.1 Entorno actual

En 2019, el 66 % de los vuelos que salieron de LAC fueron operados por aviones de fuselaje estrecho (*narrowbody*), porcentaje que aumentó al 74 % en 2024. Esto reflejó tres tendencias claves observadas en toda la región y el sector: el predominio de las actividades domésticas, el enfoque de las aerolíneas en los mercados más grandes y el continuo aumento del tamaño de las aeronaves (por ejemplo, menos frecuencias de E190/E195 y más vuelos de la familia A320/B737) para buscar mejores economías y rentabilidad de las rutas, especialmente después del COVID.

No obstante, dada la naturaleza del mercado, la necesidad de conectar mercados más pequeños y remotos, como las islas del Caribe, sigue siendo una parte esencial del ecosistema de la aviación en la región, por lo que en 2024 el 13 % del total de vuelos en la región seguían siendo operados por los aviones turbohélice. Se trata de una cuota más elevada en comparación con otras regiones del mundo, donde la media suele ser inferior al 10 %. La siguiente gráfica detalla la comparación de categorías de aeronaves entre la región LAC y otras regiones importantes del mundo.

Comparación de actividades de vuelo por región y categoría de aeronave

Cuota de tipo de aeronave (%)



Fuente: OAG, análisis de ICF.

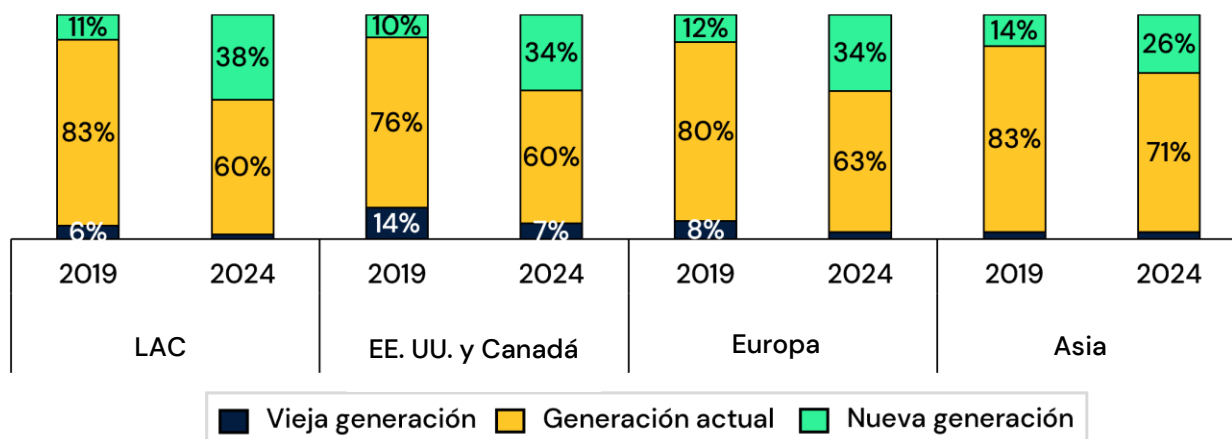
Las aeronaves son activos de larga duración que tienen una vida útil de entre 20 y 30 años; su cambio generacional conlleva cambios tecnológicos considerables. Este análisis agrupa las aeronaves en varias generaciones según la fecha en la que entraron en servicio por primera vez. Esto permite realizar comparaciones entre generaciones y observar mejoras en el consumo de combustible. La «vieja generación» incluye modelos más antiguos como el Boeing 737 Classic y el Boeing 767. La «generación actual» se refiere a modelos más recientes, como el Boeing 737NG, el Airbus A320neo y el Boeing 777. La «nueva generación» incluye aeronaves más modernas y avanzadas, como el Boeing 737MAX, el Airbus A320neo, el Boeing 787 y el Airbus A350. El pronóstico también tiene en cuenta una «futura generación», que abarca los nuevos modelos de aeronaves que se espera que entren en servicio en las próximas décadas. Se trata de aeronaves que aún no se encuentran en producción, pero que se anticipa que ofrezcan una mejora con respecto a la flota activa más avanzada representada por la categoría de «nueva generación».

En 2019, el 83 % de los ASK de salida de LAC fueron operados por aeronaves de última generación, mientras que otro 6 % lo fueron por aeronaves de vieja generación. Para 2024, varias aerolíneas habían reestructurado (o ampliado) sus flotas después del COVID, lo que elevó la cuota de ASK de las aeronaves de nueva generación en la región hasta el 38 %. Esto la convirtió en la región con la mayor cuota de los ASK operados por aeronaves de nueva generación. La cuota de la generación actual se había reducido al 60 % con la incorporación de estas nuevas aeronaves a la flota, lo cual deja solo un 2 % operado por aeronaves de vieja generación.

El cambio se observa principalmente en algunos mercados domésticos claves como Brasil, México, Chile, etc. Las solicitudes de los ASK entre la región y Norteamérica también registraron algunos cambios significativos hacia los tipos de aeronaves de próxima generación. La siguiente gráfica muestra la comparación entre la generación de aeronaves en LAC y otras regiones importantes del mundo.

Comparación de actividades de vuelo por región y generación de aeronave

Cuota de ASK (%)

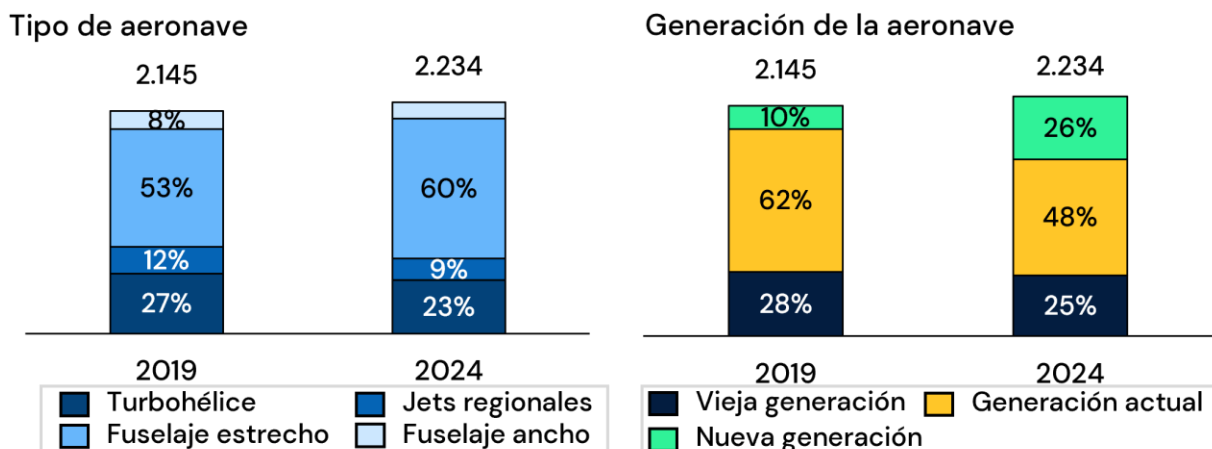


Fuente: OAG, análisis de ICF.
ASK = asientos-kilómetro disponibles.

3.1.2 Flota en servicio y cartera de pedidos

En 2019, las aerolíneas de LAC operaban conjuntamente una flota de 2145 aeronaves. Esta cifra aumentó ligeramente hasta superar las 2230 aeronaves en 2024, cuando los *jets* de fuselaje estrecho (*narrowbody*) ganaron otros 7 puntos porcentuales de cuota, lo que representa el 57 % de la flota total en servicio en 2024, mientras que la cuota de los aviones turbohélice y los *jets* regionales se redujo en 4 y 3 puntos porcentuales, respectivamente. Las aerolíneas han sustituido sus aeronaves de generación actual por aeronaves de próxima generación más eficientes en cuanto al consumo de combustible durante el ciclo de renegociación de los contratos de arrendamiento, y como resultado, la cuota de aeronaves de generación actual cayó al 48 % en 2024, mientras que la cuota de las aeronaves de nueva generación aumentó hasta el 26 %. Dado que la generación actual de aeronaves se compone principalmente de aviones de fuselaje estrecho (*narrowbody*) y *jets* regionales, estas aeronaves suelen generar mayores ATM por aeronave y, por lo tanto, representan la mayor parte de los ATM de salida en la región. Las aeronaves de vieja generación son en su mayoría pequeños turbohélices o *jets* más antiguos, por lo que las aerolíneas los conservan para satisfacer necesidades específicas del mercado o por sus costos de propiedad relativamente más bajos. El siguiente diagrama muestra el tamaño de la flota operada por las aerolíneas en LAC y su división.

Flota en servicio operada por aerolíneas de LAC (únicamente flota de pasajeros y carga, panorama a final del año)



Fuente: CAPA, análisis de ICF.

En términos de cartera de pedidos, las aerolíneas con sede en LAC registraron colectivamente 702 aeronaves en pedido, de los cuales cerca del 80 % eran jets de fuselaje estrecho (*narrowbody*). Volaris, con sede en México, tiene la cartera de pedidos más grande, con 131 aeronaves encargadas, seguida por LATAM Group, con más de 110 aeronaves. Si bien se espera que algunas de estas nuevas aeronaves contribuyan a las ambiciones de crecimiento de las distintas aerolíneas, es probable que parte del pedido se utilice para sustituir aeronaves más antiguas que se encuentran en servicio y que están cerca a su edad de retiro.

Tabla23: Flota en servicio y en pedido para las principales aerolíneas de LAC (pasajeros y carga a finales de 2024, solo pedidos en firme)¹¹⁸

Aerolínea	Flota en servicio	En pedido turbohélices	En pedido Jet regional	En pedido de fuselaje estrecho (Narrowbody)	En pedido de fuselaje ancho (Widebody)	Total de pedidos
LATAM Airlines Group	334	0	0	96	15	111
Abra Group ¹¹⁹	307	0	0	221	14	235
Azul	182	4	56	20	7	87
Grupo Aeroméxico	150	0	0	21	1	22
Grupo Volaris	113	0	0	131	0	131
Copa Airlines	112	0	0	35	0	35
Viva Aerobús	93	0	0	16	0	16
Aerolíneas Argentinas	80	0	0	6	0	6
JetSMART Group	40	0	0	76	0	76
Sky Airline	36	0	0	10	0	10
Caribbean Airlines Limited	20	0	0	1	0	1
Otros	797	22	20	23	0	65
Total	2234	26	76	577	23	702

¹¹⁸ CAPA, análisis de ICF

¹¹⁹ Representa el total entre el Grupo Avianca y Gol Linhas Aéreas (la tabla corresponde al año 2024). En noviembre de 2025, el Grupo Abra firmó un acuerdo preliminar con Sky Airlines - <https://abragroup.net/wp-content/uploads/2025/11/ENG-Comunicado-Abra-Sky-Airline.pdf> <https://abragroup.net/wp-content/uploads/2025/11/ENG-Comunicado-Abra-Sky-Airline.pdf>

3.1.3 Mejora de la eficiencia

3.1.3.1 Desempeño intergeneracional

Las aerolíneas aceleraron el ciclo de renovación de su flota durante la pandemia de COVID, con el objetivo de retirar las aeronaves más antiguas y menos eficientes en cuanto a consumo de combustible y sustituirlas por otras más modernas y eficientes. A pesar del mayor costo de adquisición, las aeronaves de nueva generación son más eficientes en cuanto al consumo de combustible y, por lo tanto, ayudan a las aerolíneas a reducir los gastos de combustible como parte de sus costos operativos. Aunque el ahorro de combustible variará según el tipo de aeronave y el vuelo operado, se acepta generalmente que será entre un 15 % y un 20 % inferior al de las aeronaves de generación actual de la misma categoría.

Por ejemplo, se anuncia que el Boeing 737MAX es hasta un 20 % más eficiente en cuanto al consumo de combustible (por asiento) que el Boeing 737NG; se obtienen ventajas similares con el Airbus A320neo en comparación con el A320ceo¹²⁰. En cuanto a los aviones de fuselaje ancho (*widebody*), se anuncia que el Airbus A330neo es hasta un 25 % más eficiente en cuanto al consumo de combustible (por asiento) que su actual A330ceo, gracias a una combinación de nuevas tecnologías de motores y una cabina más densificada¹²¹. Los Boeing 787 también se comercializan con un nivel similar de ahorro de combustible en comparación con las aeronaves de generación anterior a los que sustituyen, como los B767 y los B777-200.

ICF espera que las aeronaves de próxima generación ofrezcan una mejora similar en términos de eficiencia gracias a una combinación de tecnología de motores más avanzada, materiales más ligeros y un diseño mejorado de las aeronaves. Por ejemplo, los fabricantes de equipos originales (OEMs) de motores están desarrollando nuevos motores con una mayor relación de derivación que mejorarán la eficiencia de la propulsión; mientras tanto, los fabricantes de fuselajes (OEMs) están investigando la tecnología de alas curvadas o alas canard, que mejorará el desempeño aerodinámico. La siguiente tabla resume los supuestos que ICF ha utilizado al modelar el consumo de combustible para los tipos de aeronaves de próxima generación (combustible convencional), en concordancia con otras publicaciones del sector¹²².

Tabla24: Supuestos sobre la ganancia de eficiencia de las aeronaves de próxima generación (combustible convencional)¹²³

Categoría de la aeronave	% de ganancia de eficiencia (generación actual > nueva generación)	% de ganancia de eficiencia (nueva generación > próxima generación)
Turbohélices	15%	15%
Jet regional	15%	15%
Jet de fuselaje estrecho (<i>narrowbody</i>)	17%	22%
Jet de fuselaje ancho (<i>widebody</i>)	17%	18%

3.1.3.2 Desempeño intrageneracional

Si bien la renovación de flota generará ahorros en combustible, también se lograrán ganancias de eficiencia mediante actualizaciones dentro de la misma generación. Por ejemplo, un avión de fuselaje estrecho (*narrowbody*) fabricado en 2018 es más eficiente que el mismo modelo fabricado entre 10 y 20 años antes. Estas ganancias de eficiencia se han logrado normalmente mediante:

- Ahorro de peso: Los OEMs de aeronaves pueden reducir el peso a medida que madura el programa de aeronaves.
- Aerodinámica: Los OEMs de aeronaves han mejorado la eficiencia aerodinámica de los modelos existentes. Algunos ejemplos comunes son los *winglets* o puntas de ala, así como las superficies de reducción de resistencia. Esto proporcionó un ahorro de combustible del 2 %-4 % históricamente¹²⁴.

¹²⁰ <https://www.airbus.com/sites/g/files/jlcbta136/files/2021-12/EN-Airbus-A320-Facts-and-Figures-December-2021.pdf>

¹²¹ <https://www.airbus.com/en/products-services/commercial-aircraft/passenger-aircraft/a330-family>

¹²² IATA Aircraft Technology Roadmap to 2050 and Net zero 2050: new aircraft (diciembre de 2024)

¹²³ Análisis de ICF, Boeing Cascade.

¹²⁴ Sitio web de Airbus y Boeing.

- Motores: Los OEMs han mejorado los modelos con diversos paquetes de mejoras implementados a lo largo de la vida útil de un programa de motores. Esto proporcionó un ahorro de combustible del 2 % al 5 % históricamente¹²⁵.

En conjunto, estas ventajas intrageneracionales suelen suponer mejoras de desempeño de entre un 1 % y un 5 % en la eficiencia del combustible a lo largo de la vida útil de un tipo de aeronave ¹²⁶. La siguiente tabla resume los supuestos que ICF ha utilizado al modelar la mejora de eficiencia dentro de la misma generación de aeronaves.

¹²⁵ Actualización del CFM56-5B de GE Aerospace.

¹²⁶ ATAG Waypoint 2050.

Tabla25: Supuestos sobre el aumento de la eficiencia de las aeronaves dentro de una misma generación¹²⁷

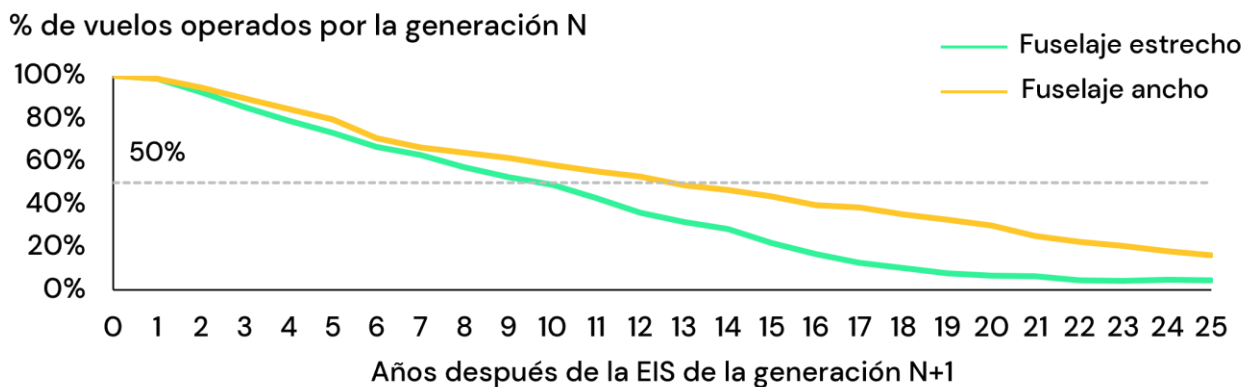
Categoría de la aeronave	Ganancia de eficiencia a lo largo de la vida útil
Turbohélices	Hasta un 2,0 %
Jet regional	Hasta un 2,0 %
Jet de fuselaje estrecho (<i>narrowbody</i>)	Hasta un 2,0 %
Jet de fuselaje ancho (<i>widebody</i>)	Hasta un 2,0 %

3.1.4 Perfil de transición de la flota

3.1.4.1 Tendencia histórica de transición

Para analizar la tendencia de transición de la flota, ICF ha examinado el número histórico de vuelos realizados por las aeronaves de generación anterior (generación N, por ejemplo, Boeing 737 clásicos, Airbus A340 y Boeing 767) en comparación con las aeronaves de próxima generación (generación N+1, por ejemplo, Boeing 737NG, A330 y Boeing 777) y ha analizado sus relaciones. Se ha observado que, en el caso de los aviones de fuselaje estrecho (*narrowbody*), alrededor del 50 % de la actividad de vuelo pasó de los modelos más antiguos a los más nuevos aproximadamente 10 años después de su entrada en servicio (EIS); y también que 20 años y más después, solo alrededor del 10 % de los modelos más antiguos siguen en funcionamiento. La tendencia también es aplicable a LAC, donde aproximadamente el 10 % de los modelos antiguos siguen en funcionamiento después de 20 años. En el caso de los aviones de fuselaje ancho (*widebody*), se observó que las tendencias de sustitución generacional tardaban un poco más. Esto es de esperarse, ya que las aerolíneas suelen operar aviones de fuselaje ancho (*widebody*) hasta una edad más avanzada en comparación con los aviones de fuselaje estrecho (*narrowbody*). La curva de transición de los aviones de fuselaje ancho (*widebody*) comienza un poco más tarde para la región LAC, pero la tasa de sustitución se recupera con el tiempo y alcanza un nivel similar en el año 20. La siguiente figura resume el resultado del análisis de transición de la flota.

Perfil de transición de la flota por porcentaje de actividades de vuelo (ATM)



Fuente: análisis de ICF.
EIS = entrada en servicio.

3.1.4.2 Últimas tendencias en transición

Si observamos las actividades globales de los aviones de fuselaje estrecho (*narrowbody*), las aeronaves de nueva generación ganaron una cuota media del 2 % cada año entre 2015 y 2024. La cifra es similar para LAC, mientras que Norteamérica y Europa se situaron aproximadamente un 1 % por delante de la media. No obstante, esta cifra está por debajo de la tendencia histórica, ya que los aviones de fuselaje estrecho (*narrowbody*) de nueva generación se enfrentaron a una serie de problemas de producción y certificación, como la inmovilización del B737MAX, el problema con los motores del A320neo y los problemas en la cadena de suministro después del COVID, que han retrasado la programación de sustitución. En cuanto a las actividades relacionadas con los aviones de fuselaje ancho (*widebody*), la nueva generación ganó una cuota media del 4 % cada año entre 2015 y 2024, en concordancia con la tendencia histórica.

¹²⁷ Análisis de ICF, Boeing Cascade.

3.1.4.3 Tendencia de transición de la flota en LAC

El último dato necesario para proyectar el plan de transición de la flota es la fecha potencial de entrada en servicio (EIS) de tipos de aeronaves futuras. ICF ha formulado los siguientes supuestos del EIS con base en diversas revisiones bibliográficas e investigaciones documentales:

Tabla 26: Supuestos de entrada en servicio (EIS) para aeronaves de próxima generación¹²⁸

Categoría de la aeronave	Tecnología	EIS estimado
Turbohélices	Combustible convencional	Mediados de 2030
	Hidrógeno / eléctrico	Posterior a 2050
Jet regional	Combustible convencional	Mediados / finales de 2030
	Hidrógeno / eléctrico	Posterior a 2050
Jet de fuselaje estrecho (<i>narrowbody</i>)	Combustible convencional	Finales de 2030
	Hidrógeno / eléctrico	Posterior a 2050
Jet de fuselaje ancho (<i>widebody</i>)	Combustible convencional	Principios de 2040
	Hidrógeno / eléctrico	Posterior a 2050

Se pronostica que la inclusión de aeronaves propulsadas por hidrógeno y electricidad en las flotas comerciales se produzca más allá del horizonte de pronóstico de este estudio. Esto se basa en varios factores críticos: la madurez tecnológica actual de estos sistemas de propulsión, las importantes incertidumbres sobre su viabilidad para la aviación comercial a gran escala y la ausencia de la infraestructura de apoyo y los marcos de trabajo regulatorios necesarios para su adopción generalizada. Por ejemplo, Airbus fijó inicialmente el objetivo de introducir aeronaves propulsadas por hidrógeno para 2035, pero en 2025 la empresa anunció un retraso, posponiendo la entrada en servicio esperada hasta finales de la década de 2040¹²⁹. Estos retrasos subrayan los retos a los que se enfrentan los fabricantes, entre ellos la necesidad de avances significativos en la tecnología de celdas de combustible, el almacenamiento y la distribución de hidrógeno, así como el desarrollo de infraestructuras aeroportuarias capaces de dar soporte a estos nuevos tipos de aeronaves. Incluso si se produce un rápido avance tecnológico y se certifican y comienzan a operar comercialmente las aeronaves eléctricas o de hidrógeno, se anticipa que su integración en las flotas de las aerolíneas para 2050 será limitada. Es probable que su adopción se limite a rutas de corto alcance, debido principalmente a las limitaciones de autonomía, la disponibilidad de infraestructura y las complejidades operativas asociadas a estos nuevos sistemas de propulsión. Como resultado, su contribución a la reducción del consumo total de combustible de aviación y de las emisiones durante el período de pronóstico será insignificante, si es que existe.

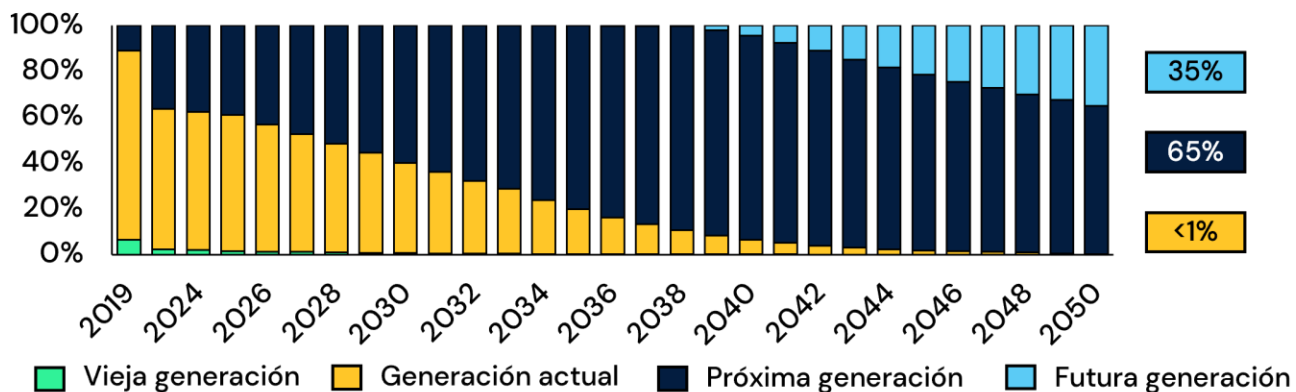
En 2024, el 2 % de los ASK que salían de LAC eran operados por aeronaves de vieja generación, y se espera que esta cifra se reduzca aún más, ya que la mayoría de estas aeronaves han superado los 20 años de antigüedad. Otro 60 % de los ASK de salida fueron operados por aeronaves de generación actual (por ejemplo, la familia A320neo, los B737NG, los E190/5, etc.), y se espera que esta proporción se reduzca gradualmente a lo largo de la próxima década, a medida que las aerolíneas sigan recibiendo aeronaves de nueva generación (por ejemplo, la familia A320neo, los B737MAX, E190/5-E2, etc.), lo que impulsará el aumento de la cuota de nueva generación. Se anticipa que una pequeña proporción de los ASK sea operada por aeronaves de combustible convencional de próxima generación a partir de 2034/5, aunque en su mayoría serán aeronaves de turbohélices, según las últimas tendencias de desarrollo observadas en el sector, antes de que los jets regionales y aviones de fuselaje estrecho (*narrowbody*) de próxima generación (de combustible convencional) entren en servicio a finales de la década de 2030. El siguiente diagrama muestra la transición generacional de la flota por ASK.

¹²⁸ Análisis de ICF, Boeing Cascade.

¹²⁹ <https://sustainabilitymag.com/articles/airbus-delays-plans-for-commercial-hydrogen-aircraft>

Las aerolíneas en LAC ya han empezado a hacer la transición a aeronaves más eficientes en consumo de combustible. Se espera que la generación futura penetre la flota a finales de la década de 2030

Composición de la flota por ASK



Fuente: análisis de ICF. ASK = asientos-kilómetro disponibles; las aeronaves de futura generación seguirán a la de NEO y MAX.

4 Mejoras operacionales y pronóstico de emisiones



4.1 Introducción

Resultados claves:

- Las mejoras operacionales en la eficiencia de las aeronaves, las operaciones aeroportuarias y terrestres, y la optimización del perfil de vuelo pueden reducir el consumo de combustible entre **un 3,3 % y un 11,3 % para 2050**, lo que equivale a una reducción del combustible para aeronaves de entre 1,0 y 3,5 Mt en 2050.
- Los ahorros iniciales provienen principalmente de medidas adoptadas por las aerolíneas y en tierra, como un rodaje eficiente y una planificación optimizada del combustible, mientras que las reducciones a largo plazo dependen de la modernización del espacio aéreo, las tecnologías avanzadas y los procedimientos transfronterizos armonizados.
- Para desbloquear todas las ventajas es necesario realizar inversiones coordinadas y alineación regulatoria, con el apoyo de un sólido sistema de monitoreo del desempeño, herramientas digitales y una estrecha colaboración entre las compañías aéreas, los aeropuertos, los ANSP y los responsables de las políticas.

En 2023, el vuelo 100 de Virgin Atlantic despegó de Londres con destino a Nueva York¹³⁰. En colaboración con los aeropuertos, el control del tráfico aéreo y otras partes interesadas, las mejoras en la eficiencia operacional redujeron el consumo de combustible del Boeing 787 y, por lo tanto, las emisiones de CO₂, en un 4,4 % en comparación con un avión que suele volar en esa ruta. La eficiencia en ruta desempeñó un papel fundamental, ya que representó el 47 % de la reducción, seguida de las iniciativas previas al vuelo, con un 27 %, y las fases de salida y llegada, con un 13 % cada una.

Las mejoras operacionales ofrecen un doble beneficio al reducir tanto las emisiones de CO₂ como el consumo de combustible de las aerolíneas. Esto es especialmente cierto en LAC, donde los precios del combustible de aviación suelen estar por encima de la media global. El vuelo 100 de Virgin Atlantic demostró que es posible obtener ahorros significativos con la tecnología existente, pero los retos meteorológicos, operativos, de congestión y de inversión siguen dificultando el escalonamiento de este logro a todo el sector. Este análisis muestra que muchos elementos operativos en LAC ya son más eficientes que la media global, aunque se podrían lograr mejoras adicionales mediante inversiones focalizadas y cambios regulatorios.

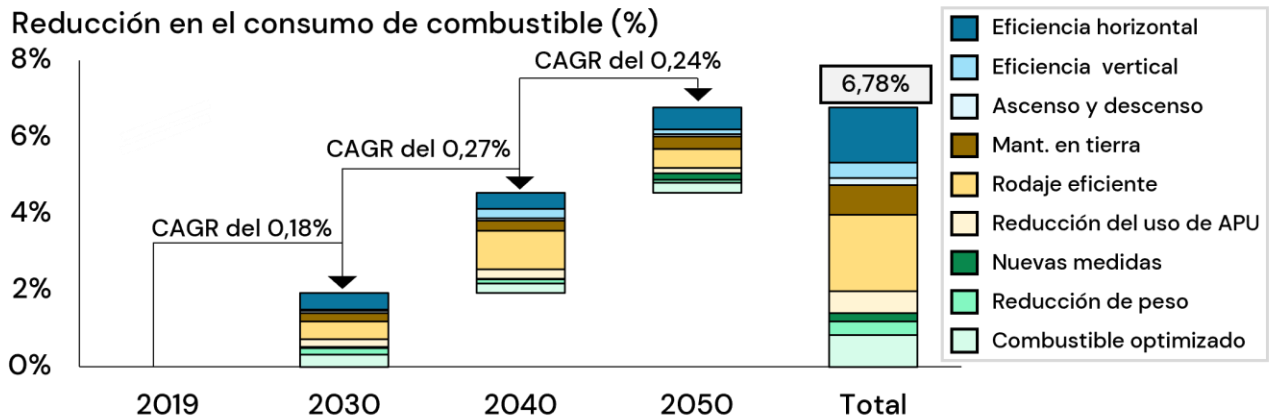
El objetivo de este estudio es estimar el potencial de mejora operacional en LAC entre 2019 y 2050, teniendo en cuenta tanto los métodos actuales como las tecnologías futuras. Se basa en estudios de casos globales para destacar los factores que impulsan estos cambios y los requisitos para lograr mayores ganancias.

4.1.1 Resumen de resultados

Las mejoras operacionales en LAC en materia de eficiencia de las aeronaves, operaciones aeroportuarias y terrestres, y optimización del perfil de vuelo pueden reducir el consumo de combustible entre un 3,3 % y un 11,3 % para 2050 en comparación con la línea base de 2019 en los escenarios modelados. Como se ilustra en la siguiente figura, estos ahorros se acumulan progresivamente con el tiempo, con ganancias iniciales impulsadas por medidas aéreas y terrestres, y reducciones más grandes a largo plazo provenientes de la modernización del espacio aéreo, las tecnologías avanzadas y la sólida colaboración entre las distintas partes interesadas. En conjunto, estas iniciativas representan una de las rutas más rentables para la reducción de emisiones, al tiempo que mejoran la resiliencia y la eficiencia operacional.

¹³⁰ <https://flywith.virginatlantic.com/content/dam/sustainability/Flight100-Executive-Summary.pdf>

Las mejoras operativas en LAC podrían reducir el consumo de combustible de las aeronaves entre 3,3–11,3% en 2050, pero requieren mayor apoyo de grupos de interés adicionales

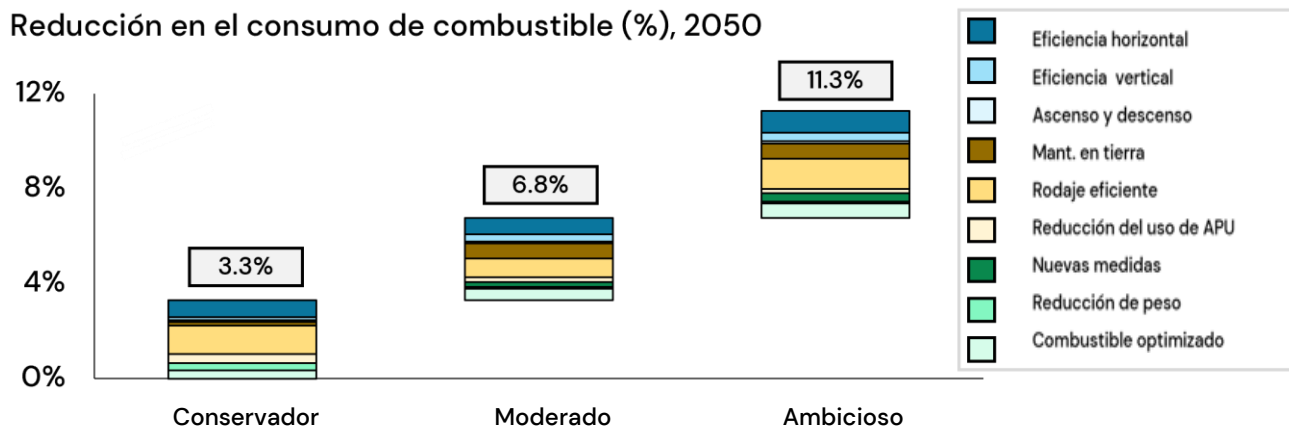


Fuente: análisis de ICF.

Nota: escenario central; las nuevas medidas incluyen vuelo en formación.

La diferencia entre los escenarios conservador y ambicioso, que oscila entre el 3,3 % y el 11,3 % en cuanto a mejoras en la eficiencia operativa, es considerable. Esto podría traducirse en un ahorro de casi 2,5 millones de toneladas de combustible de aviación al año para 2050. Lograr todo este potencial dependerá en gran medida del nivel de apoyo que presten otros sectores, tema que se analiza en detalle en este capítulo. Las diferencias entre los escenarios en 2050, desglosadas por grupo de iniciativas, se muestran en la siguiente figura.

Las diferencias en ganancias operativas dependen del apoyo de los grupos de interés y de la madurez tecnológica



Fuente: análisis de ICF.

Nota: escenario central; las nuevas medidas incluyen vuelo en formación.

Las medidas de eficiencia y planificación de las aeronaves pueden reducir el consumo de combustible entre un 0,2 % y un 1,0 % para 2030 y entre un 0,6 % y un 2,4 % para 2050. La optimización del combustible a bordo ofrece el mayor impacto potencial, pero su éxito depende en gran medida de la adopción y el avance de programas de monitoreo del comportamiento y la eficiencia. La reducción del peso a bordo mediante equipos y materiales más ligeros en la cabina puede desempeñar un papel importante, al igual que medidas novedosas como el vuelo en formación, aunque depende en gran medida de los avances tecnológicos.

Las medidas aeroportuarias y terrestres proporcionan el mayor impacto a corto plazo, con un ahorro combinado del 0,3–1,6 % para 2030, que aumentará hasta el 1,7–5,5 % para 2050, del cual el 1,2–3,3 % proviene de procedimientos de rodaje más eficientes. Para obtener máximas ganancias, se impulsará de forma agresiva la toma de decisiones colaborativa en los aeropuertos, lo que reducirá los tiempos de rodaje gracias a una mayor previsibilidad y secuenciación, mientras que la adopción del rodaje con un solo motor (SET) seguirá aumentando a medida que los procedimientos maduren. Se espera que los remolcadores eléctricos se conviertan en una medida clave para ahorrar combustible a mediados de siglo, ya que ofrecen mayores reducciones que la tecnología de SET, especialmente en los principales *hubs* con largas distancias de rodaje. Mientras tanto, la reducción del uso de las unidades de potencia auxiliar (APU) sigue siendo una medida fundamental, respaldada por el aumento de la infraestructura eléctrica en tierra y de aire preacondicionado (PCA), que permitirá un ahorro de combustible de hasta el 0,77 % para 2050. Si bien estas medidas proporcionan reducciones inmediatas y escalables de las emisiones, para alcanzar su máximo potencial requieren de una importante inversión en infraestructura y una estrecha colaboración entre los grupos de interés, y gran parte de la oportunidad depende de las mejoras en los aeropuertos y de las medidas gubernamentales, más que de las iniciativas de las aerolíneas.

La optimización del perfil de vuelo, incluyendo el ascenso y el descenso, la eficiencia vertical y la eficiencia horizontal, ofrece un ahorro del 0,2 % al 0,9 % para 2030, aumentando al 0,9 % al 3,4 % para 2050, lo que la convierte en un componente fundamental de las mejoras a largo plazo. LAC está obteniendo buenos rendimientos en cuanto a la eficiencia de los vuelos: su eficiencia horizontal se encuentra entre las más altas del mundo y sus ineficiencias en el ascenso y el descenso están por debajo de la media global, lo anterior es resultado de unas sólidas prácticas operacionales. Sin embargo, todavía hay margen para desbloquear ganancias, principalmente gracias a iniciativas de modernización del espacio aéreo, como el espacio aéreo de ruta libre (FRA), la disponibilidad dinámica de rutas y la optimización de la separación en el despegue y la salida mediante herramientas como la entrega optimizada de pistas (ORD) y la entrega optimizada de separación (OSD). Para lograr estas mejoras será necesario realizar inversiones coordinadas en la modernización de la gestión del tráfico aéreo, procedimientos transfronterizos armonizados y en establecer una estrecha colaboración entre los ANSP, los reguladores y las compañías aéreas, con el respaldo de sólidos programas de monitoreo del desempeño y de comportamiento que garanticen una adopción coherente.

La coordinación entre los grupos de interés es fundamental para lograr estos ahorros. Las mejoras operacionales requieren una estrecha colaboración entre las aerolíneas, los aeropuertos, los ANSP, los reguladores y las organizaciones de investigación. Si bien algunas medidas dependen de mejoras en la infraestructura o de la modernización del espacio aéreo, las aerolíneas pueden continuar con acciones de procedimientos operacionales, entrenamiento, programas de monitoreo del desempeño y participando en pruebas. Estas primeras medidas no solo proporcionan ganancias a corto plazo, sino que también preparan el terreno para tecnologías avanzadas y marcos de trabajo regulatorios. La siguiente figura ilustra el nivel de participación de cada parte interesada en todas las iniciativas, utilizando una escala que va desde la responsabilidad mínima (blanco) hasta la esencial (azul oscuro).

Participación de los grupos de interés por iniciativa

Escala: blanco (mínima) – azul oscuro (esencial)

Iniciativa	Aerolíneas	Aeropuertos / Terrestre	ANSP	Responsables de políticas / Reguladores	Investigación / Academia
1.3.1 Desempeño y sistemas de monitoreo de las aerolíneas	Alto	Bajo	Bajo	Medio	Bajo
1.3.2 Optimización del combustible a bordo	Alto	Bajo	Medio	Medio	Bajo
1.3.3 Reducción del peso a bordo	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Medio
1.3.4 Vuelo en formación	Medio	Bajo	Alto	Medio	Medio
1.4.2 Reducción del uso de las APU	Medio	Alto	Bajo	Medio	Bajo
1.4.3.1 Rodaje con un solo motor	Alto	Medio	Medio	Bajo	Bajo
1.4.3.2 A-CDM	Medio	Alto	Medio	Bajo	Bajo
1.4.3.3 Remolcadores eléctricos	Medio	Alto	Bajo	Medio	Bajo
1.4.4 Mantenimiento en tierra	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Medio
1.5.2.1 Ascenso y descenso continuo	Alto	Bajo	Alto	Medio	Bajo
1.5.2.2 Flaps reducidos en el aterrizaje	Alto	Medio	Bajo	Bajo	Bajo
1.5.3.1 Fase 2 del RVSM	Medio	Bajo	Alto	Alto	Medio
1.5.3.2 Procedimiento en ruta y comunicaciones por satélite de muy alta frecuencia	Medio	Bajo	Alto	Medio	Bajo
1.5.3.3 Cambios en la altitud de mitigación de estelas de condensación	Medio	Bajo	Alto	Alto	Alto
1.5.4.1 Modernización del espacio aéreo	Medio	Bajo	Alto	Alto	Medio
1.5.4.2 Armonización (Equilibrio) fiscal del espacio aéreo	Bajo	Bajo	Medio	Alto	Bajo
1.5.4.3 Gestión global de flujos	Medio	Medio	Alto	Medio	Bajo
1.5.4.4 Optimización de la separación y la separación por pares	Medio	Alto	Alto	Medio	Bajo

4.2 Alcance y metodología

Este estudio evalúa el potencial de mejora de la eficiencia operacional en LAC, centrándose en tres categorías de iniciativas:

1. Medidas de eficiencia y planificación de aeronaves.
2. Operaciones aeroportuarias y terrestres.
3. Optimización del perfil de vuelo.

Las iniciativas se seleccionaron tras consultar con los grupos de interés del sector y revisar informes de referencia claves, como el análisis del LTAG de la OACI y la Hoja de ruta Destino 2050¹³¹.

Paso 1: Estimación del ahorro de combustible por iniciativa: Para cada iniciativa, se estimó el ahorro medio de combustible por vuelo, con base en estudios de casos, evaluaciones técnicas y otros informes del sector. Cuando fue posible, se aplicó una gama de valores de ahorro bajos y altos para reflejar la incertidumbre. Si los ahorros no se habían comunicado ya en forma de porcentajes, se expresaron como reducción porcentual normalizando los ahorros absolutos de combustible con respecto al consumo medio de combustible por movimiento de tráfico aéreo en la región.

¹³¹ https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/environmental-protection/LTAG/Documents/ICAO_LTAG_Report_AppendixM4.pdf
<https://www.destination2050.eu/roadmap/>

Paso 2: Establecimiento de los niveles actuales de implementación: Las líneas base para la implementación se obtuvieron a partir de los aportes directos de los grupos de interés. Tres aerolíneas miembros de ALTA, con una flota combinada de alrededor de 300 aeronaves, respondieron a una encuesta sobre la adopción actual y prevista de las medidas LTAG de la OACI, y cuatro aerolíneas participaron en entrevistas sobre prácticas de eficiencia operacional. Esta retroalimentación se complementó con estudios de casos internacionales y con datos de adopción publicados para refinar las estimaciones regionales.

Paso 3: Proyección de la implementación hasta 2050: Se desarrollaron escenarios de implementación conservadores, intermedios y ambiciosos hasta 2050. Estas trayectorias se nutrieron de la retroalimentación de la encuesta y las entrevistas, los puntos de referencia de implementación global y la evidencia de contextos internacionales comparables. Para cada medida, la tasa de implementación prevista en un año determinado se calculó como la diferencia entre la adopción de la línea base y la tasa de adopción pronosticada.

Paso 4: Agregación del ahorro de combustible: Los ahorros anuales para toda la flota se calcularon multiplicando la tasa de implementación progresiva de cada iniciativa por sus ahorros por vuelo. En los casos en que el desempeño variaba significativamente según el tipo de aeronave, tanto los ahorros como las tasas de implementación se calcularon a nivel de aeronave y luego fueron agregados a la flota regional.

4.3 Medidas de eficiencia y planificación de aeronaves

4.3.1 Sistemas de monitoreo del desempeño de las aerolíneas

Los sistemas de monitoreo del desempeño de las aerolíneas combinan la planificación operacional el monitoreo en tiempo real y el análisis posterior al vuelo para mejorar la eficiencia del combustible en todas las fases del vuelo. Utilizan datos a gran escala e inteligencia artificial para detectar ineficiencias, recomendar mejores prácticas y animar a las tripulaciones a adoptar medidas de ahorro de combustible. Las funciones principales incluyen la planificación optimizada del combustible, el monitoreo de la trayectoria durante el vuelo y la retroalimentación posterior al vuelo. Al permitir la toma de decisiones basada en datos, estos sistemas reducen el consumo de combustible, las emisiones de CO₂ y los costos operativos.

Un estudio a gran escala de Virgin Atlantic destaca la dimensión conductual, analizando cómo influyen la retroalimentación y el establecimiento de objetivos en el comportamiento de los pilotos¹³². El estudio introdujo tres intervenciones: proporcionar información sobre oportunidades de ahorro de combustible, ofrecer objetivos personalizados y proporcionar retroalimentación mensual sobre el rendimiento. Estas intervenciones se agruparon en cuatro áreas operativas: *Ahorros en el plan de vuelo*, que animaba a los pilotos a seguir rutas y perfiles de velocidad óptimos; *carga de combustible*, que se centraba en reducir el transporte discrecional de combustible; *vuelo eficiente*, que promovía prácticas como las aproximaciones en descenso continuo; y *rodaje eficiente*, que fomentaba las operaciones de rodaje con un solo motor. Los resultados demostraron que incluso el simple hecho de anunciar que se iba a realizar un monitoreo mejoraba el cumplimiento, un fenómeno conocido como «efecto Hawthorne». En conjunto con la retroalimentación y los objetivos, estas medidas permitieron ahorrar 7769 toneladas de combustible y evitar la emisión de 24 472 toneladas de CO₂ durante los ocho meses que duró la prueba. Esta evidencia demuestra el poder de unir tecnologías con estrategias de comportamiento para lograr importantes ganancias de eficiencia.

Para evitar la doble contabilización, este estudio no modela estos ahorros como una medida independiente; en su lugar, distribuye los beneficios entre iniciativas relacionadas, como la reducción del uso de APU, la optimización del ascenso y descenso, y la reducción del combustible discrecional.

Responsabilidad de la implementación: **las aerolíneas** lideran los programas de despliegue y retroalimentación de los pilotos; **los reguladores** apoyan la gobernanza de los datos.

4.3.2 Optimización del combustible a bordo

La reducción del combustible a bordo significa optimizar las cargas de combustible para llevar solo lo necesario para las operaciones previstas, incluidas las contingencias y las reservas. Este enfoque minimiza el exceso de transporte y, a su vez, reduce el consumo de combustible durante el vuelo. Según IATA, cada tonelada adicional de combustible transportada consume aproximadamente 30 kg más de combustible por

¹³² <https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/publication/impact-management-practices-employee-productivity-field-experiment-airline-captains/>

hora¹³³. Sin embargo, en la práctica, a menudo se añade combustible adicional por motivos de seguridad, incluyendo la incertidumbre relacionada con el clima, la congestión u otras posibles necesidades de espera o desvío.

Las aerolíneas que adoptan prácticas avanzadas de planificación del combustible y sistemas de monitoreo del desempeño pueden lograr importantes mejoras en eficiencia. Las aerolíneas reportan un ahorro de hasta el 2 % gracias a la mejora de la gestión discrecional del combustible mediante programas de rendimientos avanzados¹³⁴. El estudio de Virgin Atlantic refuerza este punto: los pilotos que recibieron retroalimentación y objetivos personalizados lograron un ahorro medio de combustible de unos 191 kg por vuelo gracias a una planificación más precisa del combustible¹³⁵. A medida que evolucionen factores externos como la tecnología de pronósticos meteorológicos, las herramientas de secuenciación y otras medidas de gestión de la congestión, es posible que se reduzca el combustible discrecional necesario.

La flexibilidad regulatoria puede mejorar aún más la eficiencia. Una aerolínea de LAC informó ser la única compañía aérea que obtuvo la aprobación de su autoridad de aviación civil para reducir su margen discrecional de combustible en aeronaves de fuselaje estrecho (*narrowbody*) del 5 % estándar al 3 %. Estas aprobaciones suelen requerir sistemas de gestión de la seguridad sólidos, herramientas de planificación de vuelos avanzadas y una supervisión operativa rigurosa.

En un escenario ambicioso, las aerolíneas adoptan herramientas avanzadas de gestión del combustible que continúan evolucionando tecnológicamente con el tiempo, junto con programas de comportamiento para reducir el transporte discrecional de combustible. Se prevé que la adopción alcance el 50 % en 2030, el 75 % en 2040 y la plena implementación en 2050, lo que supondrá un ahorro neto del 1,5 % por vuelo. Por el contrario, un escenario conservador asume retrasos en la adopción, se basa en la retroalimentación menos ambiciosa, y en el estancamiento de la tecnología, lo que se traduce en un ahorro más modesto del 0,5 % por vuelo.

Dependencias: las aerolíneas tienen su propia política de combustible, análisis y entrenamiento; los reguladores permiten flexibilidad en la política de reservas; los ANSP apoyan procedimientos que reducen los requisitos de combustible de contingencia.

4.3.3 Reducción del peso a bordo

Reducir el peso de la cabina y del equipamiento a bordo es una forma comprobada de mejorar la eficiencia del combustible y reducir las emisiones. El programa FlyZero del Instituto de Tecnología Aeroespacial analizó el potencial de reducción del peso de la cabina del A320neo entre 2020 y 2030¹³⁶. El estudio estimó que el peso de la cabina podría reducirse en un 16 % mediante medidas como la instalación de asientos ligeros, la optimización de las cocinas y la eliminación de elementos no esenciales, siendo la sustitución de los asientos la medida que permitiría un mayor ahorro de peso. Se estimó que estos cambios reducirían las emisiones de CO₂ en un 0,85 % por vuelo, en consonancia con el rango LTAG de la OACI para las medidas operativas (0,65–0,85 %).

Dos de las tres aerolíneas miembros de ALTA entrevistadas esperan que las tasas de implementación se ajusten a las proyecciones del LTAG, mientras que una prevé una adopción ligeramente inferior. Estos constituyen los escenarios ambiciosos y conservadores de este estudio. El logro del escenario ambicioso depende de que las aerolíneas aceleren el reequipamiento de las cabinas, con el apoyo de incentivos para el uso de materiales ligeros y alianzas con proveedores. Los reguladores pueden apoyar esta iniciativa estableciendo objetivos de reducción de peso y publicando mejores prácticas, mientras que los fabricantes de equipos originales (OEMs) y los fabricantes de asientos avanzan en diseños ultraligeros.

¹³³ <https://www.iata.org/en/publications/newsletters/iata-knowledge-hub/fuel-efficiency-in-aviation-why-it-matters-more-than-ever/>

¹³⁴ <https://blog.openairlines.com/engaging-pilots-in-fuel-efficiency-at-azul-airlines>; <https://www.aviationbusinessnews.com/low-cost/azul-to-use-skybreathe-360-eco-flying-platform/>

¹³⁵ <https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/wp-content/uploads/2017/01/working-paper-262-Gosnell-et-al-March-2019.pdf>

¹³⁶ <https://www.ati.org.uk/wp-content/uploads/2022/03/FZO-AIR-POS-0039-Sustainable-Cabin-Design.pdf>

Ejecución: las aerolíneas especifican y adquieren medidas para reducir el peso; los proveedores y los investigadores avanzan en diseños ligeros.

4.3.4 Vuelo en formación

El vuelo en formación es una técnica táctica en la que dos o más aeronaves vuelan muy próximas entre sí, lo que permite a las aeronaves que vuelan detrás reducir la resistencia aerodinámica y ahorrar combustible. En 2021, Airbus realizó una demostración de vuelo en formación como parte del programa fello'fly, en la que dos aviones A350 volaron de Toulouse a Montreal con una separación de aproximadamente 1,2 millas náuticas¹³⁷. La prueba demostró que las aeronaves que vuelan en formación pueden ahorrar entre un 5 % y un 10 % de combustible en vuelos de larga distancia. Con base en estos resultados, Airbus lidera el proyecto GEESE (Gain Environmental Efficiency by Saving Energy) como parte de la iniciativa SESAR (Single European Sky Joint Research) en 2026, centrándose en conceptos operativos, evaluaciones de seguridad y viabilidad dentro del espacio aéreo europeo.

Los vuelos en formación son más prometedores en rutas de alta densidad con trayectorias estructuradas, como el corredor del Atlántico Norte, donde los flujos de tráfico predecibles y los largos segmentos de crucero crean condiciones favorables para emparejar aeronaves¹³⁸. Sin embargo, la complejidad operativa sigue siendo una barrera importante para el vuelo en formación y su viabilidad comercial sigue sin estar demostrada en gran medida. La coordinación de salidas, planes de vuelo y posicionamiento preciso requiere una automatización avanzada, comunicaciones sólidas entre aeronaves y el intercambio de datos en tiempo real. Estas operaciones también deben integrarse en los sistemas de control de tráfico aéreo (ATC) existentes, garantizando al mismo tiempo el cumplimiento de los estándares de seguridad, incluida la separación por turbulencia de estela. Los beneficios son asimétricos: las aeronaves que siguen obtienen la mayor parte, mientras que las que van a la cabeza obtienen pocos o ninguno, lo que requiere acuerdos comerciales o incentivos entre las aerolíneas.

Los grupos de interés se mostraron optimistas sobre la adopción del vuelo en formación, aunque las expectativas varían. Dos aerolíneas proyectaron una tasa de adopción del 3 % para 2030, y la tercera estimó un 3 % para 2040. Dos pronostican un 15 % para 2050, mientras que una pronostica un 10 %. Estas cifras constituyen la base del escenario ambicioso que se plantea en este estudio. Sin embargo, dados los importantes retos tecnológicos, regulatorios y operativos, estas previsiones se consideran muy optimistas. El escenario conservador asume una adopción del 0 % hasta 2050, lo que muestra la probabilidad de que los vuelos en formación sigan siendo en gran medida experimentales, con un uso operativo limitado para mediados de siglo. Este estudio asume que el vuelo en formación solo será aplicable a los vuelos internacionales.

Gobernanza: los ANSP y los reguladores dirigen conjuntamente los procedimientos y los casos de seguridad; las organizaciones de investigación apoyan en la elaboración de modelos y la realización de pruebas; las aerolíneas participan en pruebas y se encargan de los acuerdos comerciales.

4.3.5 Resultados de las medidas de eficiencia y planificación de aeronaves

¹³⁷ <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2024-09-airbus-and-sesar-partners-are-taking-wake-energy-retrieval-to-the-next>

¹³⁸ <https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/environmental-protection/Documents/EnvironmentReport-2010/ICAO-ENV-Report-2022-F4.pdf>

Tabla27: Implementación y ahorro de las medidas de eficiencia y planificación de aeronaves

Medida	Ahorro de combustible (%) (bajo, alto)	Implementación de la línea base (%)	Métrica	2030 (%) (bajo, alto)	2040 (%) (bajo, alto)	2050 (%) (bajo, alto)
Reducción del combustible a bordo	1 (0,5, 1,5)	5	Implementación adicional	32,5 (20, 45)	57,5 (45, 70)	82,5 (70, 95)
			Reducción del consumo de combustible en toda la flota	0,33 (0,10, 0,68)	0,58 (0,23, 1,05)	0,83 (0,35, 1,43)
Reducción del peso a bordo	0,75 (0,65, 0,85)	45	Implementación adicional	21,7 (21,7, 21,7)	36,7 (36,7, 36,7)	47,5 (45, 50)
			Reducción del consumo de combustible en toda la flota	0,16 (0,14, 0,18)	0,28 (0,24, 0,31)	0,36 (0,29, 0,43)
Vuelo en formación	7,5 (5, 10)	0	Implementación adicional	0,5 (0, 1,0)	0,7 (0, 1,3)	2,9 (0, 5,8)
			Reducción del consumo de combustible en toda la flota	0,04 (0, 0,10)	0,05 (0, 0,13)	0,22 (0, 0,58)
Reducción total del consumo de combustible en toda la flota				0,5 (0,2, 1,0)	0,9 (0,5, 1,5)	1,4 (0,6, 2,4)

Escenario ambicioso: LAC acelera el progreso mediante incentivos de políticas, la adopción de tecnología y la colaboración industrial. Las aerolíneas implementan sistemas avanzados de gestión de combustible, programas de comportamiento y aceleran el reequipamiento de las cabinas durante los ciclos de mantenimiento. Los OEMs y los proveedores suministran materiales ultraligeros, mientras que la integración y automatización digital del control del tráfico aéreo permite el vuelo en formación en determinados corredores de larga distancia. Este escenario supone un fuerte apoyo regulatorio y una importante inversión, lo que permitiría alcanzar el pleno potencial de ahorro para 2050.

Escenario intermedio: El progreso es constante, pero gradual. Las aerolíneas lideran la optimización del combustible y la reducción de peso, impulsadas por el ahorro de costos y los compromisos de sostenibilidad. La reducción del peso de la cabina se produce principalmente mediante la renovación de flota, y el *software* de gestión de combustible se convierte en un estándar en 2040. La adopción del vuelo en formación seguirá limitándose a pruebas y a unas pocas rutas operativas en 2050. Este escenario muestra las mejoras impulsadas por la industria sin medidas normativas transformadoras.

Escenario conservador: Las aerolíneas solo implementan medidas operacionales básicas, y la reducción del peso de la cabina se produce principalmente a través de la renovación natural de la flota. El vuelo en formación sigue siendo experimental, sin despliegue operativo a mediados de siglo. El ahorro de combustible es marginal y la región corre el riesgo de quedarse atrás con respecto a las mejores prácticas globales.

4.4 Operaciones aeroportuarias y terrestres

4.4.1 Introducción

Las operaciones en tierra representan alrededor del 8 % de las emisiones globales de aeronaves y ofrecen algunas de las oportunidades más inmediatas para reducir el consumo de combustible y las emisiones de CO₂¹³⁹. Sin embargo, una implementación eficaz requiere esfuerzos coordinados entre los operadores

¹³⁹ <https://www.iata.org/contentassets/d1d4d535bf1c4ba695f43e9beff8294f/airport-environmental-sustainability-policy.pdf>

aeroportuarios, las aerolíneas, los proveedores de servicios de asistencia en tierra y las autoridades regulatorias.

4.4.2 Reducción del uso de las APU

Las APU proporcionan energía y aire acondicionado cuando los motores principales están apagados, pero consumen combustible de aviación, emiten CO₂ y contaminantes locales. Su uso puede minimizarse sustituyéndolos por sistemas terrestres (AGES), tales como unidades de energía terrestres fijas (GPU) y aire preacondicionado (PCA). El aumento del uso de AGES reduce el consumo de combustible, las emisiones y el ruido durante las operaciones en tierra.

Un estudio realizado en 2016 en el aeropuerto de Zúrich evaluó los impactos de AGES y PCA en 269160 movimientos de aeronaves¹⁴⁰. Se observó que la intensidad de las emisiones variaba significativamente: Las APU emiten 337 kg de CO₂/h en aeronaves de corta distancia, frente a los 0,7 kg de CO₂/h de los AGE eléctricos, y 758 kg de CO₂/h frente a los 1,2 kg de CO₂/h en aeronaves de larga distancia. Las emisiones, que ascendieron a un total de 50066 toneladas de CO₂ cuando se utilizaron únicamente las APU, se redujeron a 8945 toneladas con el despliegue parcial de AGES, y descendieron a 2131 toneladas con el despliegue total. Esto equivale a un ahorro por vuelo de unos 178 kg de CO₂ entre los escenarios mínimo y máximo.

En 2018, el 55 % de las puertas de embarque europeas disponían de alimentación eléctrica en tierra y el 27 % contaban con PCA¹⁴¹. Los aeropuertos han impulsado la reducción de uso de APU mediante límites estrictos: Heathrow restringe el uso de las APU de fuselaje estrecho (*narrowbody*) a 15 minutos antes de la salida y 10 minutos después de la llegada, mientras que Schiphol planea un límite de cinco minutos y una cobertura PCA completa, junto con pruebas de GPU propulsadas por hidrógeno¹⁴². Las aerolíneas y los gobiernos apoyan estas iniciativas. easyJet está instalando unidades PCA híbridas en Milán Malpensa como parte del proyecto APU-ZERO, y Alemania ha financiado con 1,9 millones de euros la adquisición de 15 e-GPU en Colonia-Bonn¹⁴³. Además, soluciones de *software* como el producto Turnaround Control de Assaia pueden optimizar el uso de las GPU y han logrado un ahorro de 5 kg de CO₂ por vuelo¹⁴⁴.

En Brasil, Engie e Inframerica instalaron sistemas de energía en tierra alimentados con energía solar y sistemas PCA en el Aeropuerto Internacional de Brasilia en 2019, lo que supone un ahorro estimado de 15 kt de CO₂ al año¹⁴⁵. El proyecto se aumentará a 26 puentes de abordaje y se está implementando en los aeropuertos internacionales de Porto Alegre, Fortaleza y São Paulo, lo que reducirá colectivamente las emisiones de CO₂ en 76 kt al año y cubrirá el 28 % del mercado brasileño. Las aerolíneas también están participando por medio de la firma de acuerdos con los proveedores para reducir el uso de sus APU.

La adopción alternativa de las APU en LAC sigue estando muy por debajo de la de Europa, se estima un despliegue de un 20 %, el cual es similar al promedio de las medias globales del LTAG de la OACI. Muchos aeropuertos carecen de energía eléctrica fija en tierra y PCA, lo que obliga a depender de APU o de costosos sistemas de autoabastecimiento. Los equipos de apoyo en tierra alimentados por energías renovables suelen ser más caros que el diésel, y las estructuras de precios rara vez incentivan las opciones de bajas emisiones. Según los datos y el monitoreo del desempeño de Zurich, la reducción en el uso del APU podría suponer un ahorro de unos 183 kg de CO₂ (≈58 kg de combustible) por cada tránsito, o un 0,96 % por vuelo.

Para acelerar la reducción de las emisiones de APU en LAC requiere de acciones coordinadas. Los aeropuertos deben aumentar la disponibilidad de AGES a pesar de los elevados costos, que oscilan entre 150

¹⁴⁰ https://www.flughafen-zuerich.ch/-/jssmedia/airport/portal/dokumente/das-unternehmen/politics-and-responsibility/environmental-protection/technische-berichte/2018_zrh_aircraft-ground-energy-system.pdf?vs=1

¹⁴¹ <https://www.destination2050.eu/wp-content/uploads/2023/03/The-Price-of-Net-Zero-Report.pdf>

¹⁴² https://www.heathrow.com/content/dam/heathrow/web/common/documents/company/team-heathrow/airside/operational-safety-instructions/ASEnv_OSI_078%20Use%20of%20Aircraft%20Auxillary%20Power%20Units_v2.pdf; <https://news.schiphol.com/action-plan-targets-reduced-auxiliary-power-unit-apu-use-by-stationary-aircraft-at-schiphol/>; <https://news.schiphol.com/world-first-at-schiphol-airport-tests-the-first-hydrogen-gpu/>

¹⁴³ <https://avitrader.com/2025/03/13/easyjet-rolls-out-project-apu-zero-at-milan-malpensa/>; <https://www.cologne-bonn-airport.com/en/company/newsroom/press-releases/detail/airport-invests-in-electric-gr>

¹⁴⁴ <https://worldaviationfestival.com/blog/airlines/apronai-case-study-reducing-kerosene-costs/>

¹⁴⁵ <https://www.engie.com.br/en/imprensa/press-releases/a-pioneer-in-the-decarbonization-of-airports-in-brazil-engie-supplies-aircraft-with-renewable-energy-and-reduces-emissions/>

000 y 170 000 euros para la energía en tierra y entre 240 000 y 270 000 euros para las unidades PCA¹⁴⁶. Los reguladores pueden impulsar la adopción mediante límites de tiempo para el APU, cobros basados en las emisiones e incentivos financieros. Las aerolíneas deberían comprometerse mediante acuerdos tipo *offtake* (de compra garantizada) para asegurar la demanda, pero dichos compromisos solo serán viables si los precios son competitivos en términos de costos. Si las tendencias actuales persisten, la adopción podría alcanzar el 50 % en 2050, una década por detrás de los objetivos del LTAG de la OACI. Con una fuerte intervención mediante financiación, mandatos operativos claros y coordinación regional, la penetración podría aumentar hasta el 90 % para 2050.

Funciones: los **aeropuertos** garantizan la disponibilidad de los GPU/PCA junto con los límites de tiempo de las APU; los **aerolíneas** se comprometen mediante la compra / uso y supervisan el cumplimiento; los **responsables políticos** incentivan el uso de energías limpias; los **proveedores** y las **instituciones de investigación** desarrollan tecnologías más eficientes.

4.4.3 Rodaje eficiente

4.4.3.1 Rodaje con un solo motor

El SET utiliza un solo motor en lugar de dos para rodar entre la puerta de embarque y la pista (*SET-out*) o viceversa (*SET-in*), lo que reduce el consumo de combustible y las emisiones, al tiempo que se mantienen las operaciones en tierra seguras¹⁴⁷. En Europa, su adopción sigue siendo limitada: menos del 10 % de los vuelos utilizan *SET-out*, frente a aproximadamente el 50 % que utilizan *SET-in*. Esta diferencia muestra las limitaciones operacionales y de seguridad¹⁴⁸. El *SET-out* aumenta la carga de trabajo de los pilotos y del control de tráfico aéreo, plantea riesgos de incendio durante el calentamiento del motor y requiere tiempo para arrancar el segundo motor antes del despegue. El *SET-in* también necesita un periodo de enfriamiento antes del apagado. Ambos procesos duran unos tres minutos y requieren coordinación, y debe disponerse de un tiempo mínimo de rodaje para que sean viables. Algunos aeropuertos prohíben totalmente el SET, mientras que otros lo restringen en situaciones como el cruce de pistas activas debido al riesgo de fallo del motor¹⁴⁹.

A pesar de estos retos, las aerolíneas de LAC han logrado avances significativos en el ahorro de combustible gracias al SET. Por ejemplo, una aerolínea miembro de ALTA logró una tasa SET del 90 % gracias a procedimientos, cultura y formación sólidos, lo que demuestra que las barreras se pueden superar. Es probable que se generalice su adopción, ya que Airbus recomienda el SET como procedimiento predeterminado, y la mejora de la comunicación entre tierra y la aeronave ayuda a confirmar los umbrales mínimos de tiempo de rodaje¹⁵⁰. La tecnología también soporta el monitoreo del desempeño. Por ejemplo, Volaris utilizó las herramientas de Storkjet para descubrir que los pilotos en Cancún tenían una media de 4:14 minutos de SET frente a los 6:36 minutos posibles, lo que indica que hay margen de mejora¹⁵¹.

En 2019, los tiempos medios de salida y llegada de los aviones en 23 aeropuertos de LAC fueron de 20:36 y 8:48 minutos, similares a los de los grandes aeropuertos estadounidenses¹⁵². Utilizando estas cifras, la composición de la flota regional y las estimaciones del SESAR, un vuelo que utilizaba tanto *SET-out* como *SET-in* ahorró alrededor de un 2,2 % de combustible en comparación con uno que no utilizaba ninguno de los dos (véase la Tabla 28).

¹⁴⁶ <https://www.destination2050.eu/wp-content/uploads/2023/03/The-Price-of-Net-Zero-Report.pdf>

¹⁴⁷ <https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/webinars/Guisepppe.pdf>

¹⁴⁸ <https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/webinars/Guisepppe.pdf>

¹⁴⁹ <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2024-07/eurocontrol-sustainable-taxi-operations-conops.pdf>

¹⁵⁰ <https://aircraft.airbus.com/en/services/enhance/system-upgrades/single-engine-taxi-without-auxiliary-power-unit-setwa>

¹⁵¹ <https://storkjet.com/wp-content/uploads/2024/06/Volaris-Case-Study-2024.pdf>

¹⁵² <https://ansperformance.eu/efficiency/>; <https://www.atlantis-press.com/proceedings/icmsem-23/125992457>

Tabla28: Beneficios medios del SET por tipo de aeronave

Categoría de la aeronave	Ahorro de combustible (kg/min)	Ahorro en el rodaje de salida (kg/aeronave)	Ahorro en el rodaje de entrada (kg/aeronave)
Turbohélice	2	41	18
Jet regional	4	82	35
Jet de fuselaje estrecho (Narrowbody)	5	103	44
Jet de fuselaje ancho (Widebody)	10	206	88

Los datos específicos de LAC son limitados, pero es probable que las tasas sean similares a las de Europa, alrededor del 10 % para SET-out y del 50 % para SET-in, dadas las reglas de seguridad y los objetivos de ahorro de combustible comparables. Para aumentar su adopción se necesitará algo más que mejoras tecnológicas: los aeropuertos deben proporcionar directrices operativas claras, los organismos reguladores deben estandarizar los procedimientos SET y las aerolíneas deben integrar el SET en la formación y el monitoreo del desempeño. Una mejor comunicación entre tierra y aeronave y la integración de SET en las herramientas de planificación de vuelos también serán fundamentales para lograr una mayor aceptación.

Palancas de adopción: las aerolíneas actualizan los procedimientos operativos estándar (SOP), el entrenamiento y el monitoreo; los aeropuertos/ANSP proporcionan orientaciones locales claras y previsibilidad en los tiempos de rodaje.

4.4.3.2 Toma colaborativa de decisiones en aeropuertos

La toma colaborativa de decisiones en aeropuertos (A-CDM) mejora la eficiencia, la previsibilidad y el uso de los recursos de los aeropuertos al permitir el intercambio de información en tiempo real entre los operadores aeroportuarios, el control del tráfico aéreo, las aerolíneas, los operadores de servicios en tierra y los gerentes de la red. Al compartir hitos claves como el tiempo bloque de salida objetivo (TOBT), el tiempo de encendido aprobado (TSAT) y el tiempo de despegue objetivo (TTOT), la A-CDM optimiza la secuenciación de salidas, reduce los retrasos en el rodaje y apoya medidas de ahorro de combustible como SET.

La A-CDM está implantada en 34 aeropuertos europeos, mientras que los aeropuertos más pequeños utilizan alternativas como la torre ATC avanzada cuando no se justifica su plena implementación¹⁵³. La revisión realizada por EUROCONTROL en 17 aeropuertos reveló una reducción media del tiempo de rodaje del 7 %¹⁵⁴. Trece informaron de ahorros cuantificables en el tiempo de salida de la pista, y siete lograron reducciones de un minuto o más por vuelo. En Heathrow, la mejora de la precisión de la A-CDM redujo la desviación media respecto a la hora de despegue prevista de 8:40 minutos a 30 segundos. La implementación de la A-CDM requiere una sólida coordinación entre los grupos de interés, una infraestructura digital robusta y datos precisos en tiempo real. EUROCONTROL estima que los costos oscilarán entre 750 000 y 5 000 000 de euros, con unos costos operativos anuales de entre 50 000 y 500 000 euros.

En 2025, el Aeropuerto Internacional El Dorado de Bogotá se convirtió en el primero de América Latina en implementar la A-CDM, lo que permitió el intercambio de datos entre las aerolíneas, los operadores de tierra y el ATC¹⁵⁵. La adopción regional puede avanzar si los aeropuertos y las aerolíneas establecen procesos claros de CDM, se comprometen a compartir datos y a realizar formaciones conjuntas, y despliegan centros de operaciones aeroportuarias centrados en la eficiencia. La A-CDM también puede integrarse con el ATCO CDM (véase la sección 4.5.4.3), lo que requiere una coordinación regional. En un escenario ambicioso, la A-CDM

¹⁵³ <https://www.eurocontrol.int/concept/airport-collaborative-decision-making>

¹⁵⁴ <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-04/a-cdm-impact-assessment-2016.pdf>

¹⁵⁵ <https://www.sita.aero/pressroom/news-releases/el-dorado-becomes-first-airport-in-latin-america-to-implement-a-cdm-system/>

podría abarcar los aeropuertos que gestionan el 25 % de los vuelos de LAC en 2030 y el 50 % en 2040. Este estudio estima una reducción del 7 % en los tiempos de rodaje de salida de los aviones, y señala que la A-CDM también permite otras mejoras operativas.

Responsabilidad: Los aeropuertos dirigen los centros de operaciones y el intercambio de datos; los ANSP integran los hitos ATC; las aerolíneas proporcionan aportes precisos sobre el tiempo estimado de despegue (TOBT) y el tiempo estimado de llegada (TSAT) y cumplen con los tiempos calculados para las ventanas de despegue.

4.4.3.3 Remolcadores eléctricos

Los remolcadores eléctricos son tractores de remolque especializados que permiten a las aeronaves rodar por la pista sin utilizar sus motores JET. Un ejemplo notable es el TaxiBot, desarrollado en 2009 por Israel Aerospace Industries (IAI) en colaboración con TLD, una empresa de equipos de servicio en tierra, y que entró en servicio en 2014 con Lufthansa en el aeropuerto de Fráncfort¹⁵⁶. Según Lufthansa, el uso de TaxiBot puede ahorrar entre 50 y 100 kg de combustible por vuelo de Boeing 737¹⁵⁷. En la India, TaxiBot se utiliza con fines comerciales desde 2018 y actualmente se utiliza en varios aeropuertos. En Delhi, las operaciones con aeronaves A320 y 737 ahorran alrededor de 532 kg de CO₂ por aeronave por cada remolque de 14 minutos con TaxiBot¹⁵⁸. En Europa, TaxiBot se está probando como parte de la iniciativa HERON (Highly Efficient Green Operations) de SESAR, y se prevé que su adopción a gran escala reduzca el consumo de combustible hasta en un 50 % y hasta en un 85 % en las rutas de rodaje más largas¹⁵⁹. Aunque TLD anunció planes para introducir TaxiBots en Brasil en 2015, no se han comunicado más novedades al respecto¹⁶⁰.

Actualmente, TaxiBot está certificado para las familias A320 y 737, con una versión para aviones de fuselaje ancho planeada y una versión totalmente eléctrica esperada para 2026. Destinations 2050 estima que un remolcador eléctrico para aeronaves de fuselaje estrecho cuesta alrededor de 1,4 millones de euros, mientras que las versiones para aeronaves de fuselaje ancho cuestan aproximadamente el doble. Suponiendo que se tarda tres minutos en acoplar, dos en desacoplar y seis horas de uso diario, la mayoría de los aeropuertos necesitarían cinco unidades o menos, mientras que los principales hubs podrían necesitar más de 80¹⁶¹. Estas cifras destacan la magnitud de la inversión y la planificación de infraestructuras necesarias para una adopción generalizada en LAC, cuyos principales costos probablemente recaerían en los aeropuertos y los operadores de servicios de asistencia en tierra.

El uso generalizado de remolcadores eléctricos en LAC requerirá una inversión coordinada y el apoyo normativo. Los aeropuertos y los proveedores de servicios de asistencia en tierra deberían financiar la adquisición de remolcadores eléctricos y la infraestructura de apoyo, como estaciones de recarga e instalaciones de mantenimiento, mientras que los gobiernos pueden acelerar la adopción mediante incentivos financieros y programas de financiación ecológica. Las aerolíneas deben incorporar las operaciones con remolcadores eléctricos en sus procedimientos y colaborar con los aeropuertos para optimizar los procesos de tránsito (*turnaround*). La adopción temprana puede comenzar con programas piloto en los principales hubs, lo que permitirá a los grupos de interés probar las operaciones, formar al personal y recopilar datos de desempeño para crear un sólido argumento comercial que justifique una implantación más amplia.

Dado que los remolcadores eléctricos ahorran más combustible de rodaje que el SET, se espera que sean los preferidos. En un escenario ambicioso, la adopción podría alcanzar el 10 % para los aviones de fuselaje estrecho en 2030 y el 80 % en 2050. En el caso de los aviones de fuselaje ancho, es poco probable que se adopte antes de 2030, pero podría aumentar hasta el 60 % en 2050. La implementación total del escenario ambicioso es similar al LTAG de la OACI, mientras que el escenario de línea base se ajusta estrechamente a la retroalimentación de los grupos de interés.

¹⁵⁶ <https://taxibot-international.com/>

¹⁵⁷ <https://taxibot-international.com/2017/10/09/iais-taxibot-obtained-faa-certification-for-the-boeing-737-family/>

¹⁵⁸ <https://www.tld-group.com/technologies/taxibot/>

¹⁵⁹ <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2025-07-taxibots-spool-up-as-project-heron-winds-down>

¹⁶⁰ <https://airconnected.com.br/releases/novidade-do-tld-group-em-equipamentos-aerportuarios-taxibot-chega-em-breve-ao-pais/>

¹⁶¹ <https://www.destination2050.eu/wp-content/uploads/2023/03/The-Price-of-Net-Zero-Report.pdf>

Funciones sugeridas: los aeropuertos y los operadores prestan apoyo a los remolcadores y a la recarga; **los responsables políticos** ofrecen financiación ecológica e incentivos; **las aerolíneas** ajustan los procesos de tránsito para integrar las operaciones de remolque y participan en proyectos piloto de viabilidad comercial.

4.4.3.4 Subresultados eficientes del rodaje

Tabla29: Implementación y ahorros del rodaje eficiente

Mejora	Ahorro de combustible (%) ¹⁶²	Implementación de la línea base (%)	Métrica	2030 (%) (bajo, alto)	2040 (%) (bajo, alto)	2050 (%) (bajo, alto)
SET	NB: 2,77 WB: 0,85	22	Implementación adicional	13 (8, 18)	14,1 (18, 10,2)	8,6 (28, -10,9)
			Reducción del consumo de combustible en toda la flota	0,28 (0,17, 0,38)	0,32 (0,39, 0,26)	0,18 (0,59 -0,2)
A-CDM	NB: 0,45 WB: 0,15	0	Implementación adicional	15 (5, 25)	30 (10, 50)	45 (20, 70)
			Reducción del consumo de combustible en toda la flota	0,05 (0,02 0,09)	0,11 (0,04, 0,18)	0,16 (0,07, 0,25)
Remolcadores eléctricos	NB: 3,2-5,5 WB: 1,1-1,9	0	Implementación adicional	4,7 (0, 9,5)	33,6 (0,95, 57,8)	49,7 (20,5, 78,9)
			Reducción del consumo de combustible en toda la flota	0,15 (0, 0,37)	1,06 (0,22, 2,3)	1,65 (0,54, 3,22)
Reducción total del consumo de combustible en toda la flota				0,5 (0,2, 0,8)	1,5 (0,6, 2,7)	2,0 (1,2, 3,3)

4.4.4 Mantenimiento en tierra

El mantenimiento en tierra se refiere a las acciones rutinarias que mantienen el desempeño del motor y del fuselaje para minimizar el consumo de combustible. Estas medidas incluyen, entre otras, el lavado de los motores en el ala, la reparación o sustitución de las palas y la limpieza exterior para reducir la resistencia aerodinámica. Estas medidas evitan la degradación del desempeño que aumenta el consumo de combustible. Los estudios de casos muestran beneficios significativos. El programa de lavado de motores EcoPower de Pratt & Whitney informa de un ahorro de combustible de hasta un 1,2 % por lavado, y Southwest Airlines ha ahorrado más de 9 millones de galones de combustible y evitado la emisión de unas 90 000 toneladas de CO₂ desde 2006¹⁶³.

El LTAG estima que la reducción de emisiones derivada de las mejoras en el mantenimiento en tierra oscilará entre el 0,2 % y el 1,9 % por vuelo, y que su implementación será del 30 % en 2020, del 50 % en 2030, del 70 % en 2040 y del 100 % en 2050. Las aerolíneas de LAC estiman que la implementación de estas cifras se retrasará ligeramente hasta 2040, pero se puede acelerar mediante la inversión de las aerolíneas en procedimientos de mantenimiento.

Responsabilidad: las aerolíneas y las MRO (centro especializado en el mantenimiento, reparación y revisión general de aeronaves) programan y ejecutan programas; **la investigación** identifica mecanismos eficaces.

¹⁶² NB: aviones de fuselaje estrecho. WB: aviones de fuselaje ancho.

¹⁶³ <https://carbonoffsetsdaily.com/news-channels/usa/southwest-airlines-saves-millions-on-fuel-and-reduces-co2-emissions-with-pratt-whitney-ecopowerr-engine-wash-6787.htm>

4.4.5 Resultados de las operaciones aeroportuarias y terrestres

Tabla30: Implementación y ahorros de operaciones aeroportuarias y terrestres

Mejora	Ahorro de combustible (%) (bajo, alto)	Implementación de la línea base (%)	Métrica	2030 (%) (bajo, alto)	2040 (%) (bajo, alto)	2050 (%) (bajo, alto)
Reducción del uso de las APU	0,96	10	Implementación adicional	20 (10, 30)	45 (30, 60)	60 (40, 80)
			Reducción del consumo de combustible en toda la flota	0,19 (0,1, 0,29)	0,43 (0,29, 0,58)	0,58 (0,38, 0,77)
Rodaje eficiente	N/A	N/A	Reducción del consumo de combustible en toda la flota	0,5 (0,2, 0,8)	1,5 (0,6, 2,7)	2,0 (1,2, 3,3)
Mantenimiento en tierra	1,05 (0,2, 1,9)	25	Implementación adicional	20 (15, 25)	45 (45, 45)	75 (75, 75)
			Reducción del consumo de combustible en toda la flota	0,21 (0,03, 0,48)	0,47 (0,09, 0,86)	0,79 (0,15, 1,43)
Reducción total del consumo de combustible en toda la flota				0,88 (0,32, 1,60)	2,40 (1,02, 4,17)	3,36 (1,74, 5,45)

Escenario ambicioso: LAC acelera el progreso mediante un sólido apoyo normativo, inversiones coordinadas y la integración digital. Los aeropuertos aumentan la disponibilidad de AGES y PCA e invierten en infraestructura para remolcadores eléctricos, mientras que las aerolíneas se comprometen a utilizar estos sistemas mediante acuerdos de compra. La adopción del SET se optimiza mediante tecnología, programas de comportamiento y mejoras de procedimientos, así como la implantación de remolcadores eléctricos en los principales *hubs*. La A-CDM se convierte en estándar en los grandes aeropuertos, con el apoyo de los centros de operaciones aeroportuarias y un sólido intercambio de datos. Los reguladores imponen límites de tiempo para el uso de las APU, incentivan el uso de energía eléctrica de baja emisión en tierra y proporcionan financiación ecológica para remolcadores eléctricos, mientras que los proveedores de tecnología ofrecen AGES rentables, remolcadores eléctricos y plataformas digitales para optimizar las escalas. Este escenario refleja la plena colaboración de la industria y el liderazgo político para lograr la máxima eficiencia.

Escenario intermedio: El progreso es constante, pero desigual. Los aeropuertos aumentan gradualmente los sistemas AGES y PCA, pero la inversión en remolcadores eléctricos sigue siendo limitada. Las aerolíneas adoptan ampliamente el SET, pero retrasan la integración a gran escala de los remolcadores eléctricos debido a las diferencias de costos e infraestructura, y la A-CDM solo se implementa en algunos *hubs*. Los reguladores introducen algunas restricciones e incentivos para las APU, pero las medidas carecen de consistencia en toda la región. Las aerolíneas y los aeropuertos colaboran en materia de entrenamiento e intercambio de datos, pero sin una política sólida ni financiación, la adopción de tecnologías avanzadas sigue siendo lenta. Se han logrado ganancias de eficiencia, pero aún queda un potencial significativo sin explotar.

Escenario conservador: La adopción sigue siendo mínima debido a la débil acción regulatoria y a la limitada inversión. Algunos operadores privados siguen implementando AGES y PCA, pero los elevados costos de las energías renovables hacen que las GPU diésel resulten más atractivas, lo que ralentiza la transición hacia una energía terrestre con bajas emisiones. Las aerolíneas implementan el SET de manera inconsistente y los remolcadores eléctricos siguen estando prácticamente ausentes. La A-CDM solo se utiliza en unos pocos aeropuertos. Los reguladores no hacen cumplir los límites de las APU ni ofrecen incentivos significativos, y los

proveedores de tecnología ven poca demanda de soluciones avanzadas. El ahorro de combustible es marginal y la región corre el riesgo de quedarse atrás con respecto a las mejores prácticas globales.

4.5 Optimización del perfil de vuelo

4.5.1 Introducción

La optimización del perfil de vuelo se centra en mejorar la eficiencia de las trayectorias de las aeronaves para reducir el consumo de combustible y las emisiones. En él participan partes interesadas, como los ANSP, reguladores y compañías aéreas, que colaboran para minimizar las ineficiencias en el ascenso, el vuelo de crucero y el descenso. Un ejemplo notable es la métrica NATS 3Di del Reino Unido, que mide la eficiencia del espacio aéreo comparando las rutas de vuelo reales con una trayectoria óptima basada en rutas ortodrómicas y niveles de vuelo solicitados¹⁶⁴. La Autoridad de Aviación Civil del Reino Unido (CAA) regula este sistema e incentiva el desempeño vinculando recompensas o sanciones económicas a las puntuaciones 3Di, con un impacto potencial equivalente al 1 % de los ingresos anuales de NATS. EUROCONTROL aplica un enfoque similar a través de su sistema de revisión del desempeño, que realiza un seguimiento de la eficiencia de los vuelos en todo el espacio aéreo europeo con el fin de apoyar la optimización continua y reducir las emisiones de CO₂ relacionadas con las aeronaves.

4.5.2 Optimización del ascenso y descenso

Las fases de ascenso y descenso ofrecen importantes oportunidades para reducir el consumo de combustible mediante perfiles y procedimientos optimizados. Las operaciones de ascenso continuo (CCO), las operaciones de descenso continuo (CDO) y los aterrizajes con *flaps* reducidos minimizan las nivelaciones, reducen la resistencia aerodinámica y mejoran la eficiencia. Estas medidas dependen tanto de la tecnología como de la ejecución, y requieren capacidades de navegación avanzadas, coordinación de ATC y un cumplimiento constante por parte de los pilotos, respaldado por entrenamiento y monitoreo.

4.5.2.1 Operaciones de ascenso y descenso optimizadas

Las CCO y las CDO permiten a las aeronaves ascender y descender sin nivelaciones innecesarias, lo que reduce los cambios de empuje y el tiempo a altitudes ineficientes. La función *Top of Descent* (ToD) optimizada garantiza que el descenso comience en el punto más eficiente en función del desempeño y las condiciones del viento.

Las CCO y las CDO están generalizadas a nivel global. Un estudio realizado por EUROCONTROL en 2017 reveló que el 94 % de los vuelos en Europa utilizan CCO hasta FL100 y el 74 % hasta el final del ascenso, mientras que el 41 % utiliza CDO a partir de FL75 y el 24 % a partir del final del descenso¹⁶⁵. En la región SAM de la OACI, las tasas fueron mucho más bajas, con un 34 % para los CDO y un 26 % para los CCO, por debajo del objetivo del 40 % establecido por la Declaración de Bogotá¹⁶⁶. La navegación basada en el desempeño (PBN) es un habilitador clave para las CCO y las CDO, ya que permite a las aeronaves seguir trayectorias laterales y verticales precisas, lo que reduce la necesidad de nivelaciones¹⁶⁷. En la región SAM, la cobertura de PBN alcanzó el 71 % para las salidas y el 55,7 % para las llegadas en 2024, frente al 66 % y el 50,7 % en 2019¹⁶⁸.

Los estudios demuestran que las CDO ofrecen mayores beneficios que las CCO. EUROCONTROL estimó que los vuelos que no utilizan las CDO podrían ahorrar 46 kg de combustible por vuelo, en comparación con los 15 kg de las CCO¹⁶⁹. Como parte de su Informe medioambiental de 2022, la OACI llevó a cabo un estudio sobre ascensos y descensos por región, en el que se cuantificó el consumo de combustible derivado de ascensos y descensos ineficientes sobre la base de la media de todos los vuelos en las respectivas regiones (véase *la*

¹⁶⁴ https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2016/ENVReport2016_pg138-140.pdf

¹⁶⁵ <https://www.eurocontrol.int/concept/continuous-climb-and-descent-operations>

¹⁶⁶ https://www.2023.icao.int/SAM/Documents/2017-RAAC15/RAAC15_WP08.pdf

¹⁶⁷ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261925001205>

¹⁶⁸ <https://www.2023.icao.int/NACC/Documents/Meetings/2023/GREPECAS21/GRP21WP10.pdf>

¹⁶⁹ <https://www.eurocontrol.int/concept/continuous-climb-and-descent-operations>

Tabla 31)¹⁷⁰. Los resultados muestran que los ahorros potenciales (es decir, la ineficiencia) en las regiones del Caribe y Sudamérica son significativamente inferiores a la media global.

Tabla31: Media del potencial de ahorros de las CDO y las CCO por región de la OACI

Región de la OACI	Exceso de combustible en las CDO (kg)	Exceso de combustible en las CCO (kg)
Asia y Pacífico (APAC)	47	13
África Oriental y Meridional (ESAF)	23	2
Europa y Atlántico Norte (EUR/NAT)	37	4
Oriente Medio (MID)	60	9
Norteamérica (NAM)	43	5
Caribe / Sudamérica (CAR/SAM)	24	3
África Occidental y Central (WACAF)	20	1
Total	41	7

El monitoreo del desempeño ha demostrado ser eficaz para mejorar el cumplimiento. Por ejemplo, NATS en el Reino Unido informa que el desempeño de la aproximación en descenso continuo (medido desde aproximadamente 6000 pies) mejoró del 56 % al 76 % entre 2006 y 2016 gracias al monitoreo y la retroalimentación¹⁷¹. EUROCONTROL publica métricas de las CDO por estado, aerolínea y aeropuerto, que muestran variaciones significativas: en 2024, Estonia alcanzó un 71,5 % de las CDO desde el inicio del descenso, en comparación con el 13,1% de Alemania, con una media del 33%¹⁷². Las aerolíneas también pueden beneficiarse del monitoreo. Wizz Air, en colaboración con Storkjet y la Universidad Politécnica de Silesia, introdujo un indicador clave de desempeño (KPI) para el consumo de combustible en descenso y proporcionó retroalimentación mensual a los pilotos¹⁷³. Esto redujo el consumo total de combustible en descenso en un 8 % durante el primer año, impulsado por un mejor cumplimiento de la velocidad y por estimaciones más precisas del inicio del descenso. Sin embargo, una encuesta realizada en 2019 reveló que menos del 30 % de las aerolíneas miden su propio desempeño de los CCO/CDO¹⁷⁴.

Se pueden lograr mayores ganancias de eficiencia de ascenso y descenso mediante procedimientos de navegación avanzados. Los procedimientos avanzados de desempeño de navegación requerido (RNP), que forman parte del marco de trabajo de PBN, permiten a las aeronaves seguir rutas muy precisas con monitoreo y alertas de desempeño a bordo. Esta precisión reduce las millas de trayectoria (*track miles*) y respalda las CCO y las CDO. En Santiago, se introdujeron salidas RNP avanzadas para proporcionar trayectorias laterales y verticales precisas, y cuando se combinaron con aproximaciones paralelas independientes en condiciones visuales, estos cambios proporcionaron un ahorro anual estimado de 380 toneladas de combustible¹⁷⁵. Del mismo modo, en los aeropuertos de Concepción y Atacama, las aproximaciones RNP avanzadas acortaron las

¹⁷⁰ <https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/environmental-protection/Documents/EnvironmentReport-2010/ICAO-ENV-Report-2022-F4.pdf>

¹⁷¹ <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/5881.pdf>

¹⁷² <https://ansperformance.eu/efficiency/vfe/>

¹⁷³ <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/5881.pdf>

¹⁷⁴ https://www2023.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2019/ENVReport2019_pg145-152.pdf

¹⁷⁵ IATA.

rutas de llegada y mejoraron la consistencia del inicio del descenso, lo que supuso un ahorro anual estimado de 192 toneladas de combustible para una aerolínea.

Para LAC, las mejoras potenciales de la OACI se utilizan como línea base para los ahorros potenciales. Dado que el análisis de la OACI ya tiene en cuenta la combinación actual de vuelos optimizados y no optimizados, este estudio establece una implementación de línea base del 0 % en 2019 a efectos de modelización, aunque las aerolíneas ya apliquen prácticas de optimización del ascenso y el descenso. Aunque es poco probable que las CCO y CDO lleguen a optimizarse por completo debido a las limitaciones del terreno, el espacio aéreo y la complejidad del tráfico, es posible lograr mejoras significativas. Esto depende del aumento de la cobertura de PBN, de la implementación de herramientas avanzadas de gestión de vuelos y trayectorias, y del fortalecimiento del monitoreo del desempeño. La retroalimentación habitual a las aerolíneas y los pilotos, respaldada por KPI claros y análisis posteriores a las operaciones, ha demostrado su eficacia en otras regiones y debería ampliarse en LAC. Este estudio asume que, del ahorro potencial restante, se puede lograr un 15 % adicional por década. Para las CDO, se utilizan los ahorros medios de la región NAM para los aterrizajes fuera de LAC.

Modelo de entrega: los ANSP habilitan los procedimientos de PBN y RNP y proporcionan autorizaciones; las aerolíneas los integran en los SOP, aumentan los entrenamientos de los pilotos e implementan programas de monitoreo y optimización del desempeño; los reguladores establecen objetivos de desempeño y garantizan la transparencia.

4.5.2.2 Flaps reducidos

La reducción de los *flaps* es un procedimiento por el cual la aeronave aterriza utilizando una configuración más baja de los *flaps* cuando las condiciones lo permiten. Esto reduce la resistencia aerodinámica en la aproximación final, lo que requiere menos empuje del motor y reduce el consumo de combustible. El procedimiento solo se utiliza cuando la longitud de la pista, las condiciones meteorológicas y el peso de la aeronave lo permiten, y no compromete la seguridad.

La experiencia en el sector sugiere que los aterrizajes con *flaps* reducidos ahorran entre 7 y 10 kg de combustible por aterrizaje en aviones de fuselaje estrecho y hasta 25 kg en aviones de fuselaje ancho¹⁷⁶. Un análisis realizado por Airbus reveló que Wizz Air ahorra alrededor de 15 kg de combustible por aproximación gracias al uso de *flaps* reducidos en el aterrizaje, lo que la convierte en líder del sector en cuanto a la adopción de esta técnica¹⁷⁷. Aunque hay poca información pública sobre la configuración de *flaps* reducidos en LAC, hay indicios de que algunas compañías aéreas la han implementado con éxito.

Para acelerar la adopción de *flaps* reducidos, se requieren procedimientos estandarizados en todos los aeropuertos elegibles, respaldados por indicaciones para los *electronic flight bags* (EFB), entrenamiento de pilotos, integración de SOP y monitoreo del desempeño con retroalimentación. En un escenario ambicioso, estas medidas se implementarán en toda la región para 2040, mientras que, en un escenario conservador, su adopción seguirá limitada a unas pocas compañías aéreas y aeropuertos. Aunque se desconoce la tasa actual de uso de los procedimientos con *flaps* reducidos en LAC, se asume que está alrededor del 30 %, lo que supone aproximadamente la tasa máxima posible con la tecnología actual. En un escenario ambicioso, esto podría aumentar cerca de un 10 % por década.

Habilitación: las aerolíneas son responsables de desarrollar y actualizar los SOP, impartir entrenamiento focalizado a los pilotos e implementar programas de monitoreo del desempeño; los aeropuertos prestan su apoyo publicando los procedimientos locales y garantizando que las condiciones de las pistas permitan operaciones con *flaps* reducidos.

¹⁷⁶ <https://blog.openairlines.com/what-you-need-to-know-about-reduced-landing-flaps>

¹⁷⁷ <https://www.wizzair.com/en-gb/information-and-services/about-us/news/2020/10/29/wizz-air-develops-new-fuel-saving-initiatives-in-commitment-to-reducing-emissions>

4.5.2.3 Subresultados de las operaciones de ascenso y descenso

Tabla32: Implementación y ahorro en operaciones de ascenso y descenso

Mejora	Ahorro de combustible (%)	Implementación de la línea base (%)	Métrica	2030 (%) (bajo, alto)	2040 (%) (bajo, alto)	2050 (%) (bajo, alto)
CCO	0,05	0	Implementación adicional	10 (5, 15)	20 (10, 30)	30 (15, 45)
			Reducción del consumo de combustible en toda la flota	0,00 (0,00, 0,01)	0,01 (0, 0,01)	0,01 (0,01, 0,02)
			Implementación adicional	10 (5, 15)	20 (10, 30)	30 (15, 45)
CDO	0,44	0	Reducción del consumo de combustible en toda la flota	0,04 (0,02, 0,07)	0,09 (0,04, 0,13)	0,13 (0,07, 0,2)
			Implementación adicional	5 (0, 10)	12,5 (5, 20)	20 (10, 30)
			Reducción del consumo de combustible en toda la flota	0,01 (0, 0,02)	0,02 (0,01, 0,04)	0,03 (0,01, 0,05)
Flaps reducidos	0,16 (0,13, 0,18)	30	Implementación adicional	5 (0, 10)	12,5 (5, 20)	20 (10, 30)
			Reducción del consumo de combustible en toda la flota	0,01 (0, 0,02)	0,02 (0,01, 0,04)	0,03 (0,01, 0,05)
			Reducción total del consumo de combustible en toda la flota	0,06 (0,02, 0,09)	0,12 (0,06, 0,18)	0,18 (0,09, 0,27)

4.5.3 Eficiencia vertical en ruta

La eficiencia vertical en ruta significa la reducción del tiempo pasado en crucero por debajo del nivel de vuelo óptimo. Cuando las aeronaves no pueden alcanzar o mantener altitudes eficientes debido a normas de separación, restricciones de tráfico o retrasos en las comunicaciones, el consumo de combustible y las emisiones aumentan. El análisis de la OACI de 2025 sobre la eficiencia vertical del vuelo (VFE-ER) muestra que el consumo adicional de combustible aumenta con la longitud de la etapa de vuelo, desde 49,7 kg para vuelos de menos de 500 nm hasta 267,6 kg para vuelos de más de 6500 nm¹⁷⁸. La ineficiencia media global fue de 63,2 kg por vuelo, lo que destaca una importante oportunidad de mejora.

4.5.3.1 Altimetría geométrica y Fase 2 de la RVSM

La altimetría geométrica utiliza mediciones basadas en GNSS para determinar la altitud real, lo que permite una separación vertical más precisa que los sistemas barométricos. Respaldada la Fase 2 de la Separación Vertical Mínima Reducida (RVSM), que propone reducir la separación mínima de 1000 pies a 500 pies, lo que permite a las aeronaves volar más cerca de los perfiles óptimos. La RVSM original, que redujo la separación de 2000 pies a 1000 pies, se implementó entre 1997 y 2005 y redujo el consumo de combustible en Europa entre un 1,6 % y un 2,3 %¹⁷⁹. Se espera que el ahorro derivado de la Fase 2 de la RVSM sea similar.

Actualmente, la Fase 2 de la RVSM sigue en concepto y validación como parte de los programas SESAR y OACI, con pruebas centradas en la seguridad, la turbulencia de estela y los estándares de aviónica. La implementación requerirá una estandarización global, equipos GNSS y alineación regulatoria. En un escenario

¹⁷⁸ https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/environmental-protection/Documents/EnvironmentReport-2010/2025/Envreport2025_38.pdf

¹⁷⁹ Mínimos de separación vertical reducidos (RVSM) | SKYbrary Aviation Safety; <https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/awards2021/R-WAKE%20and%20GEOMETRIC%20ALTIMETRY.pdf>

ambicioso, la adopción temprana de la altimetría geométrica y los procedimientos de la Fase 2 de RVSM podría comenzar en corredores seleccionados para la década de 2040, con el apoyo de la modernización de los ANSP y los programas de equipamiento de las aerolíneas. Un escenario conservador supone que no se adoptará la Fase 2 de la RVSM dentro del horizonte del estudio, lo que limita las ganancias a las mejoras procedimentales.

Prerrequisitos: los ANSP y los organismos reguladores lideran el desarrollo de los estándares y la validación de la seguridad; el sistema de apoyo a la investigación realiza pruebas de desempeño; las aerolíneas se preparan para futuras mejoras de capacidad e integración de procedimientos.

4.5.3.2 ITP y comunicaciones VHF por satélite

La optimización vertical oceánica es esencial para los vuelos de larga distancia que atraviesan espacios aéreos sin vigilancia, donde la separación procedimental a menudo obliga a las aeronaves a volar por debajo de su altitud óptima durante largos periodos de tiempo. Existen dos elementos claves, el procedimiento *in-trail* (ITP) y las comunicaciones por satélite de muy alta frecuencia (VHF), diseñados para superar estas limitaciones y desbloquear una gestión más eficiente de la altitud.

El ITP es una aplicación de Vigilancia Dependiente Automática–Radiodifusión de entrada (ADS–B) que permite a una aeronave ascender o descender a través de la altitud de otra aeronave en la misma ruta utilizando una separación basada en la distancia¹⁸⁰. Las pruebas realizadas por la Administración Federal de Aviación (FAA) en las regiones de información de vuelo (FIR) de Oakland y Anchorage registraron un ahorro medio de 573 lb (≈ 260 kg) por vuelo en las aeronaves equipadas con ITP, incluso sin maniobras, gracias a una mejor percepción de la situación y a cambios de altitud más tempranos.

Las VHF por satélites, probadas como parte del programa ECHOES de SESAR, proporcionan conectividad de voz y datos en regiones oceánicas y remotas¹⁸¹. El proyecto ECHOES logró la primera comunicación por voz VHF vía satélite entre un piloto y un centro ATC sobre el Atlántico en 2025, lo que confirmó su viabilidad¹⁸². Estas pruebas, en las que participaron Iberia, Air Europa y TAP Air Portugal, demostraron que las VHF por satélite pueden soportar una separación reducida y una gestión dinámica de la altitud en los corredores oceánicos. SESAR ha anunciado que la siguiente fase de pruebas incluirá el corredor del Atlántico Sur en colaboración con Brasil, un paso fundamental para las operaciones de LAC.

Con base en la retroalimentación de las aerolíneas, este estudio asume una tasa inicial de implementación del ITP del 25 % en 2020, que aumentará hasta situarse entre el 80 % y el 90 % en 2050. Estos ahorros se aplican únicamente a los vuelos con aviones de fuselaje ancho (*widebody*), utilizados como referencia para los vuelos de larga distancia, en los que son pertinentes los procedimientos ITP. Las ventajas de las VHF por satélite no se cuantifican por separado en este análisis debido a la escasez de datos, pero se reconoce que esta tecnología es un factor fundamental para alcanzar estos niveles de adopción. Para lograr una alta adopción, es necesario que las aeronaves estén equipadas con ADS–B In, así como con actualizaciones del sistema de gestión del tráfico aéreo para procesar las solicitudes ITP. Los requisitos de inversión son significativos. El LTAG de la OACI estima que las mejoras del sistema de gestión del tráfico aéreo oceánico para el ITP costarán aproximadamente 3 000 000 de dólares por sistema y, para las compañías aéreas, el equipamiento y la activación del ADS–B In se estiman en 15 000 dólares por aeronave¹⁸³. Estas cifras destacan la necesidad de una inversión coordinada por parte de los ANSP, las aerolíneas y los proveedores de tecnología para lograr una alta adopción.

Co-inversión: los ANSP actualizan los sistemas de gestión del tráfico aéreo; las aerolíneas equipan ADS–B In y participan en investigaciones y pruebas; los reguladores coordinan los procedimientos entre las FIR; las organizaciones de investigación apoyan la validación de la tecnología, las pruebas operativas y el análisis del desempeño.

¹⁸⁰ https://www.faa.gov/air_traffic/technology/adsb/pilot/itp

¹⁸¹ <https://www.sesar.eu/news/testing-get-underway-2025-low-orbit-satellite-communication-technology>

¹⁸² https://www.enaire.es/en_GB/2025_06_24/ndp_gb_startical_successfully_launched_second_satellite_iod2

¹⁸³ https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/environmental-protection/LTAG/Documents/ICAO_LTAG_Report_AppendixM4.pdf

4.5.3.3 Cambios en la altitud de mitigación de estelas de condensación

La mitigación de las estelas de condensación implica ajustar la altitud de crucero para evitar las capas frías y húmedas donde se forman estelas persistentes, las cuales son uno de los principales factores que contribuyen al impacto climático no relacionado con el CO₂ de la aviación. A diferencia de otras medidas de esta sección, la mitigación de las estelas de condensación no ahorra combustible, sino que aumenta el consumo de combustible en los vuelos ajustados. Los estudios y ensayos indican que los vuelos que evitan las regiones donde se forman estelas de condensación suelen consumir aproximadamente un 2 % más de combustible en esos vuelos ajustados¹⁸⁴.

Sin embargo, la formación de estelas de condensación está muy concentrada: las investigaciones muestran que alrededor del 5 % de los vuelos son responsables del 80 % del calentamiento relacionado con las estelas de condensación¹⁸⁵. Esto significa que las estrategias focalizadas pueden aportar importantes beneficios climáticos con un impacto operativo limitado. Con estos programas focalizados, se estima que el aumento del consumo de combustible de toda la flota será de entre el 0,01 % y el 0,3 %, al tiempo que se mitigará una gran parte del calentamiento provocado por las estelas de condensación¹⁸⁶. En este estudio, estas medias se ajustan a la baja en un 50 % porque los vuelos de salida de LAC son menos propensos a requerir grandes desvíos, dado que las zonas más sensibles a las estelas de condensación se concentran en otras regiones, como el corredor del Atlántico Norte. A pesar del consumo adicional de combustible, la mitigación de las estelas de condensación sigue siendo una medida climática eficaz, y en este estudio se considera un escenario de caso alto como el caso más optimista, lo que muestra su probable adopción junto con otras mejoras operativas importantes.

Marco de trabajo de decisiones: la investigación proporciona pronósticos sobre estelas de condensación y métricas de impacto; los ANSP y los reguladores permiten flexibilidad táctica; las aerolíneas aplican ajustes de altitud focalizados.

4.5.3.4 Subresultados de la eficiencia vertical en ruta

Tabla33: Implementación y ahorros de las mejoras verticales en ruta

Mejora	Ahorro de combustible (%)	Implementación de la línea base (%)	Métrica	2030 (%) (bajo, alto)	2040 (%) (bajo, alto)	2050 (%) (bajo, alto)
RVSM	1,95 (1,60, 2,30)	0	Implementación adicional	0	10 (0, 20)	15 (0, 30)
			Reducción del consumo de combustible en toda la flota	0	0,20 (0, 0,46)	0,29 (0, 0,69)
ITP	0,76 (0,65, 0,87)	8	Implementación adicional	6,33 (0, 12,65)	13,45 (7,91, 18,98)	20,56 (17,4, 23,73)
			Reducción del consumo de combustible en toda la flota	0,05 (0, 0,11)	0,10 (0,05, 0,17)	0,16 (0,11, 0,21)
Mitigación de estelas de condensación	-0,08 (-0,01, -0,15)	0	Implementación adicional	5 (0, 10)	20 (10, 30)	50 (20, 80)

¹⁸⁴ <https://blog.google/technology/ai/ai-airlines-contrails-climate-change/>

¹⁸⁵ <https://notebook.contrails.org/contrails-org-why-its-time-to-change-course-for-the-climate/>

¹⁸⁶ <https://www.transportenvironment.org/articles/contrail-avoidance>

Reducción del consumo de combustible en toda la flota	0.00. (0, -0,02)	-0,02 (0, -0,05)	-0,04 (0, -0,12)
Reducción total del consumo de combustible en toda la flota	0,04 (0, 0,10)	0,28 (0,05, 0,58)	0,41 (0,11, 0,78)

4.5.4 Eficiencia horizontal

Un estudio de la OACI sobre el tráfico de 2017 estimó la eficiencia de los vuelos horizontales entre el 94 % y el 98 % por región, con Sudamérica y la ESAF cerca del 98 % y el Caribe algo más del 97 %¹⁸⁷. Esto demuestra que LAC ya opera con una alta eficiencia horizontal; sin embargo, medidas focalizadas como la modernización del espacio aéreo, las estructuras de cobro de tarifas armonizadas, la gestión colaborativa del flujo y las herramientas de separación dinámica aún pueden entregar ganancias progresivas. Incluso en escenarios ambiciosos, la eficiencia del 100 % no es realista debido a limitaciones persistentes, como las variaciones meteorológicas, las reservas temporales de espacio aéreo, las restricciones del terreno y los requisitos de secuenciación cerca de los aeropuertos.

4.5.4.1 Modernización del espacio aéreo

Los vuelos solían seguir rutas aéreas fijas, lo que a menudo provocaba itinerarios ineficientes y un mayor consumo de combustible. El espacio aéreo de ruta libre (FRA) permite a las aerolíneas planificar trayectorias directas entre puntos de entrada y salida definidos cuando hay espacio aéreo disponible. El FRA ha logrado importantes ganancias en Europa, reduciendo la prolongación media de las rutas del 3,58 % en 2007 al 1,59 % en 2024¹⁸⁸. EUROCONTROL estima que el FRA cubre ahora más del 75 % del espacio aéreo europeo y que su plena aplicación podría suponer un ahorro de 6 Mt de combustible.

En LAC, como parte del proyecto CADENA (Red de Intercambio de Datos ATFM de CANSO para las Américas), se llevaron a cabo pruebas de optimización de extremo a extremo en cuatro rutas entre Estados Unidos y América Latina durante 90 días¹⁸⁹. Los ahorros, extrapolados a un año (un avión, cinco vuelos semanales), fueron sustanciales: Atlanta–Lima: 845 360 kg de CO₂, Atlanta–Buenos Aires: 444,590 kg CO₂, Miami–Piarco: 271 934 kg de CO₂, y Houston–Puerto Vallarta: 307 168 kg de CO₂. En un solo vuelo, el ahorro de CO₂ del trayecto directo de Atlanta a Lima se estimó en 3673,73 kg. Además, en Centroamérica, el programa «Cielo Único» de COCESNA está invirtiendo 24,6 millones de euros durante seis años para estandarizar e interconectar los sistemas ATC de seis Estados, mejorando las opciones de rutas y la resiliencia¹⁹⁰.

Incluso con el FRA, siguen existiendo algunas restricciones para la gestión del tráfico o el uso militar, tal y como se publica en el Documento de Disponibilidad de rutas (RAD), que define cuáles rutas están abiertas o cerradas en momentos específicos. En LAC, varias partes interesadas han identificado el espacio aéreo militar no utilizado como una ineficiencia clave, aunque este problema no se limita a LAC. Un estudio de EUROCONTROL de 2024 reveló que entre el 30 % y el 50 % del espacio aéreo militar reservado no se utiliza realmente. Ya que la planificación militar suele realizarse con antelación, esto permitiría a los operadores utilizar las rutas óptimas, las aerolíneas suelen presentar los planes de vuelo con hasta 10 horas de antelación, lo que crea una diferencia. En Francia, por ejemplo, se ha observado que los vuelos sobrevuelan el espacio aéreo reservado incluso fuera de las horas reservadas, lo que da lugar a una prolongación adicional de la ruta de entre un 2 % y un 4 %.

La gestión dinámica RAD relaja temporalmente las restricciones cuando el tráfico y la dotación de personal lo permiten, lo que habilita rutas más directas el día de las operaciones. Las pruebas realizadas por SESAR y

¹⁸⁷ <https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/environmental-protection/Documents/EnvironmentReport-2010/ICAO-ENV-Report2019-F1-WEB-1.pdf>

¹⁸⁸ [https://www.eurocontrol.int/concept/free-route-airspace#:~:text=Free%20route%20airspace%20\(FRA\)%20is,network%2C%20subject%20to%20airspace%20availability](https://www.eurocontrol.int/concept/free-route-airspace#:~:text=Free%20route%20airspace%20(FRA)%20is,network%2C%20subject%20to%20airspace%20availability)

¹⁸⁹ <https://airspace.canso.org/canso-airspace-magazine-58-2023/planning-the-perfect-flight>

¹⁹⁰ https://www.indracompany.com/sites/default/files/230510_pr_indra_cocesna.pdf

EUROCONTROL en 2500 vuelos demostraron que la eliminación de determinadas restricciones permitió ahorrar una media de 44 kg de combustible y 138 kg de CO₂ por vuelo, lo que demuestra que el RAD dinámico es un complemento eficaz del FRA¹⁹¹.

En Colombia, ya se están realizando esfuerzos para reducir las ineficiencias causadas por las restricciones del espacio aéreo militar. Tras la intervención de IATA, el espacio aéreo de Palanquero se está flexibilizando, lo que se espera que suponga un ahorro medio de combustible de 117 kg por vuelo en comparación con las rutas tradicionales¹⁹².

Un nivel adicional de modernización del espacio aéreo involucra la sectorización dinámica, que optimiza la configuración de los sectores ATC en tiempo real en función de la demanda de tráfico y la carga de trabajo de los controladores. Los sistemas automatizados evalúan continuamente las posibles combinaciones de sectores, proponiendo configuraciones que equilibran la capacidad y la complejidad. Este enfoque permite a los controladores gestionar flujos de tráfico complejos de forma más eficaz, maximizando las ventajas del FRA y la RAD dinámica.

Sin embargo, no todos los esfuerzos de modernización garantizan una mayor eficiencia. Un estudio de caso realizado por una parte interesada de la ALTA destacó que el amplio y complejo espacio aéreo de Brasil supone un reto especial. Los operadores podían enviar solicitudes de rutas preferidas para optimizar la eficiencia, pero, al combinarlas, algunas integraciones aumentaron el consumo de combustible en determinadas regiones, aunque se lograron mejoras en otras. Los grupos de interés también señalaron que la flexibilidad táctica a la hora de cambiar las rutas preferidas sigue siendo fundamental para maximizar las ganancias operativas.

Dado el elevado nivel de línea base, se estima que las posibles ganancias de eficiencia horizontal en ruta derivadas de la modernización del espacio aéreo en LAC oscilan entre el 1,0 % y el 1,5 %. Incluso con una implementación ambiciosa, es imposible alcanzar una eficiencia del 100 % debido a factores inevitables como las condiciones meteorológicas, el espacio aéreo militar, el terreno y la secuenciación cerca de los aeropuertos.

En un escenario de implementación de caso bajo, el progreso se limitaría a una cobertura parcial del FRA, restricciones de rutas estáticas, una coordinación transfronteriza mínima y una reconfiguración poco frecuente del sector, con una coordinación civil-militar que seguiría siendo *ad hoc* y pocas herramientas de apoyo a la toma de decisiones disponibles. Por el contrario, un escenario de alta implementación requiere la adopción completa del FRA en las principales FIR, la gestión dinámica de la disponibilidad de rutas y la sectorización en tiempo real con el apoyo de herramientas automatizadas. Para lograrlo se necesita un sólido apoyo institucional y financiero: inversión en infraestructura de vigilancia y comunicaciones, políticas armonizadas entre los ANSP, aprobaciones reglamentarias y entrenamiento integral de los controladores. Otros factores facilitadores son los acuerdos civiles-militares estructurados para un uso flexible del espacio aéreo, los incentivos basados en el desempeño para los ANSP y el acceso a financiación verde o a fondos de bancos de desarrollo para compensar los costos. El análisis transparente posterior a las operaciones y los marcos de trabajo de gobernanza regional, como CADENA o CIIFRA, son esenciales para mantener las mejoras y garantizar la responsabilidad.

Propiedad: los ANSP y los reguladores ofrecen FRA, RAD dinámico y sectorización mediante acuerdos transfronterizos coordinados; **las aerolíneas** utilizan tácticamente rutas directas y participan en pruebas; **los reguladores** facilitan la coordinación civil-militar para desbloquear el espacio aéreo restringido y garantizar acuerdos de uso flexibles; **la investigación** respalda el diseño del sistema, el análisis del desempeño y la validación de conceptos operativos.

4.5.4.2 Paridad de tasas del espacio aéreo

Al planificar un vuelo, las aerolíneas equilibran el consumo de combustible, las condiciones meteorológicas y los cargos por uso del espacio aéreo para minimizar los costos operativos. Diferencias significativas en los

¹⁹¹ <https://www.sesar.eu/news/sesar-partners-offer-dynamic-solution-lowering-aviations-carbon-footprint>

¹⁹² IATA.

cargos pueden influir en la selección de la ruta y dar lugar a trayectos más largos y menos eficientes en cuanto al consumo de combustible. El análisis de la NASA sobre los vuelos transatlánticos reveló que el consumo adicional de combustible entre las rutas óptimas en términos de costo y las rutas óptimas en términos de combustible era de 0,4 a 1,0 toneladas en dirección este y de 0,5 a 0,9 toneladas en dirección oeste¹⁹³. Por ejemplo, en un vuelo Chicago-Londres, la ruta que minimiza el consumo de combustible permitiría ahorrar 500 kg menos de combustible (55 100 kg frente a 55 600 kg), pero supondría un cobro adicional de 400 dólares (1800 dólares frente a 1400 dólares), lo que ilustra cómo el precio del combustible y los cobros influyen conjuntamente en las decisiones sobre las rutas.

En LAC, las disparidades en los cargos son muy marcadas. Las aerolíneas evitan las FIR como Argentina, Brasil y Venezuela, donde los cobros internacionales en ruta son de 1163, 919 y 505 dólares por cada 1000 km, en comparación con los 228 dólares de Chile y los 295 dólares de Perú. Las tarifas domésticas suelen ser mucho más bajas; en Argentina, los cobros en ruta doméstica son de solo 4 dólares por cada 1000 km, en comparación con los 1163 dólares de las tarifas internacionales. Estos desequilibrios provocan desvíos que aumentan el consumo de combustible y las emisiones. En un escenario bajo, los cargos permanecen sin cambios y no se produce ninguna mejora. En un escenario ambicioso, los gobiernos armonizan los cargos en ruta o introducen mecanismos de paridad, lo que permite a las aerolíneas seleccionar las rutas óptimas en cuanto al consumo de combustible y aprovechar al máximo estos ahorros.

Entre los principales obstáculos para armonizar los cargos se encuentran la fragmentación regulatoria, la dependencia de las tasas de sobrevuelo como fuente de ingresos y la ausencia de un marco de trabajo regional de recuperación de costos. Estas cuestiones pueden abordarse mediante acuerdos regionales como parte de la OACI o la CANSO, basándose en iniciativas como CADENA y CIIFRA. Un enfoque por fases podría incluir la publicación de puntos de referencia transparentes, la introducción de límites máximos de cargos o corredores de paridad, y la vinculación de las reformas de las tarifas a objetivos medioambientales, de modo que los estados puedan acceder a financiación ecológica o compensar el impacto en los ingresos. La colaboración con las aerolíneas y las instituciones financieras puede ayudar a diseñar mecanismos sin impacto en los costos, como la puesta en común de ingresos o los incentivos para el crecimiento del tráfico, con el fin de mantener los ingresos estatales y reducir al mismo tiempo los precios distorsionados. La armonización de las tarifas por el uso del espacio aéreo no se modela de forma independiente en este estudio, sino como parte de la modernización del espacio aéreo.

Liderazgo: los responsables de las políticas armonizan los cobros en ruta mediante acuerdos regionales; **los ANSP** ofrecen estructuras transparentes de costos.

4.5.4.3 Gestión global del flujo de tráfico aéreo

Si bien la A-CDM mejora la eficiencia a nivel aeroportuario, una gestión más amplia del flujo de tráfico aéreo (ATFM), incluida la ATFM global, es fundamental para equilibrar la demanda y la capacidad en toda la red, reducir las esperas en el aire y mejorar la previsibilidad. En lugar de absorber los retrasos en el aire, la ATFM permite trasladar los retrasos al suelo o ajustar las trayectorias en ruta, donde el consumo de combustible es mínimo. Esto se apoya en herramientas como los tiempos de despegue calculados (CTOT), que las aeronaves deben cumplir dentro de un margen de tolerancia reducido, normalmente de -5 a +10 minutos. Mediante una secuenciación más precisa de salidas y llegadas, la ATFM ayuda a reducir la congestión en los aeropuertos concurridos y los puntos de congestión en ruta en las múltiples FIR.

A nivel global, los programas de ATFM están aumentando. La Autoridad Aeroportuaria de la India informó de 757 iniciativas de ATFM en 2024, lo que supuso un ahorro estimado de 32 654 toneladas de combustible y 103 186 toneladas de CO₂ gracias a la reducción de los retrasos en vuelo y la mejora del cumplimiento de los CTOT¹⁹⁴. Las tasas de cumplimiento mejoraron del 77 % en 2023 al 85 % en 2024, alcanzando el 98 % durante los últimos meses del año, lo que demuestra el valor de la participación coordinada de los grupos de interés.

¹⁹³ <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20160008910/downloads/20160008910.pdf>

¹⁹⁴ <https://www.atfmaai.aero/portal/sites/default/files/CATFM%20Post%20ops%20Annual%20Report%202024.pdf>

En LAC, las aerolíneas ya retrasan las salidas en tierra cuando se anticipan retrasos en las llegadas, y formalizar estos procedimientos a través de programas regionales o transfronterizos de ATFM podría generar ganancias cuantificables en términos de eficiencia. El LTAG estima que el ahorro podría oscilar entre el 0,02 % y el 0,053 % por vuelo. Una implementación exitosa requiere de un marco de trabajo regional coordinado de ATFM, con un equilibrio compartido entre la demanda y la capacidad, procedimientos en armonía y un estricto cumplimiento de los CTOT. Las lecciones aprendidas del programa de ATFM de la India demuestran que el cumplimiento mejora cuando los CTOT se integran en las autorizaciones para encender motores, las franjas horarias revisadas se coordinan de forma proactiva y las franjas horarias se asignan antes en la escala. Para lograrlo, es necesario invertir en el intercambio de datos en tiempo real, en herramientas de apoyo a la toma de decisiones y en la integración de los datos operativos de las compañías aéreas, con el respaldo de la armonización regulatoria y los acuerdos transfronterizos. Según la retroalimentación de los grupos de interés, la implementación global de la ATFM podría alcanzar entre el 50 % y el 100 % para 2050.

Cumplimiento: **los ANSP** gestionan la ATFM; **las aerolíneas y los aeropuertos** integran los CTOT en la escala; **los reguladores** armonizan los procedimientos en todas las FIR.

4.5.4.4 Apoyo a la optimización de la entrega en pista y reducción de la separación por pares.

La congestión en los principales aeropuertos suele provocar largas colas de rodaje para las salidas y esperas en el aire para las llegadas, lo que incrementa el consumo de combustible y las emisiones. Estas ineficiencias pueden deberse a las reglas de separación basadas en categorías fijas de estela turbulenta y mínimos de separación estáticos. Las herramientas modernas permiten optimizar dinámicamente las separaciones entre aeronaves, manteniendo la seguridad y mejorando la eficiencia.

Para las salidas, la OSD calcula la separación entre aeronaves en tiempo real, utilizando modelos avanzados de estela turbulenta, como RECAT-EU y el enfoque de separación por pares¹⁹⁵. En lugar de aplicar una regla uniforme a todas las aeronaves, la OSD determina la separación mínima segura para cada par y la ajusta en función de factores como los vientos cruzados. Las pruebas de SESAR en los principales aeropuertos europeos indican que la OSD puede acortar las colas de salida, aumentar la predictibilidad y reducir el consumo de combustible durante el rodaje en pista en torno a un 6 %.

En la zona de llegadas, las herramientas de entrega optimizada en pista (ORD) permiten a los controladores gestionar la separación en la aproximación final con mayor precisión. En el aeropuerto Heathrow de Londres, NATS comparó las emisiones medias de CO₂ por aeronave durante los periodos comprendidos entre enero y mayo de 2024 y enero y mayo de 2025, es decir, antes y después de la introducción de la separación por pares¹⁹⁶. Los datos mostraron una reducción aproximada de 240 kg de CO₂ por aeronave, lo que sugiere una mejora potencial en la eficiencia operativa, al tiempo que se mantienen llegadas seguras y ordenadas.

En LAC, se han logrado varias mejoras en la separación gracias a cambios en los procedimientos. En el aeropuerto de São Paulo Guarulhos, la dependencia entre las llegadas y las salidas en pistas paralelas muy próximas entre sí exigía separaciones prolongadas, lo que provocaba retrasos y un consumo adicional de combustible¹⁹⁷. En 2018 se introdujeron operaciones segregadas en condiciones visuales, lo que permite llegadas independientes en una pista y salidas en la otra. Esto redujo la separación de aproximación de 5 NM a 3 NM y el espaciado de salida a aproximadamente 1,5 minutos, lo que aumentó la capacidad de la pista de 52 a 60 operaciones por hora. El ahorro anual estimado es de unas 3200 toneladas de combustible en vuelo y 1250 toneladas durante el rodaje para los 270 000 movimientos anuales del aeropuerto. Se obtuvieron ganancias adicionales gracias a la reducción de las maniobras de aproximación frustrada innecesarias mediante la introducción de mínimos de separación entre pistas reducidos, lo que evitó unas 34 maniobras de aproximación frustrada en 2024. Ambas medidas mejoran la predictibilidad y reducen el desperdicio de combustible, y pueden aplicarse en otros aeropuertos con diseños de pistas adecuados, supervisión de seguridad y entrenamiento de controladores.

¹⁹⁵ <https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/solution/PJ02-01-02%20Contextual%20Note.pdf>

¹⁹⁶ <https://www.nats.aero/news/nats-delivers-on-time-boost-and-carbon-cuts-with-world-first-at-heathrow/>

¹⁹⁷ IATA.

El LTAG de la OACI estima un ahorro global de combustible entre 0,038 % y 0,189 % por vuelo para la OSD y del 0,511 % al 0,758 % para la ORD. La retroalimentación de los grupos de interés sugiere que la implementación se retrasará con respecto a estas estimaciones. Para acelerar la implementación de la entrega optimizada de pistas y la reducción de la separación por pares en la región LAC, es esencial seguir varios pasos: En primer lugar, los reguladores deben aprobar los estándares de separación e integrarlas en los procedimientos nacionales. Los ANSP y los aeropuertos deben invertir en herramientas de optimización en tiempo real que se conecten con los sistemas de gestión de llegadas y salidas, respaldadas por datos precisos sobre el viento y la turbulencia de estela. Los programas de entrenamiento de controladores deben actualizarse para insertar estos nuevos conceptos en las operaciones diarias, también deben priorizarse las mejoras de infraestructura, como las pistas de rodaje de salida rápida, en los aeropuertos de alta densidad. Las limitaciones, como la complejidad de las flotas mixtas y las restricciones locales en materia de ruido, pueden gestionarse mediante implementaciones por fases y evaluaciones del desempeño basadas en datos.

Lanzamiento: los ANSP y los organismos reguladores aprueban y aplican la separación dinámica; **los aeropuertos** integran herramientas de pista; **las aerolíneas** adaptan sus SOP y sus horarios.

4.5.4.5 Subresultados de eficiencia horizontal

Tabla34: Implementación y ahorros derivados de mejoras horizontales en la eficiencia

Iniciativa	Ahorro de combustible (%)	Implementación de la línea base (%)	Métrica	2030 (%)	2040 (%)	2050 (%)
Modernización del espacio aéreo	1,25 (1, 1,5)	0	Implementación adicional	22,5 (15, 30)	45 (30, 60)	67,5 (45, 90)
			Reducción del consumo de combustible en toda la flota	0,28 (0,15, 0,45)	0,56 (0,30, 0,90)	0,84 (0,45, 1,35)
Gestión global de flujos	0,04 (0,02, 0,05)	0	Implementación adicional	12,5 (0, 25)	37,5 (25, 50)	75 (50, 100)
			Reducción del consumo de combustible en toda la flota	0,00 (0,00, 0,01)	0,01 (0,01, 0,03)	0,03 (0,01, 0,05)
OSD	0,11 (0,04, 0,19)	0	Implementación adicional	18,8 (12,5, 25)	37,5 (25, 50)	75 (50, 100)
			Reducción del consumo de combustible en toda la flota	0,02 (0,0, 0,05)	0,04 (0,01, 0,09)	0,09 (0,02, 0,19)
ORD	0,63 (0,51, 0,76)	0	Implementación adicional	18,8 (12,5, 25)	37,5 (25, 50)	75 (50, 100)
			Reducción del consumo de combustible en toda la flota	0,12 (0,06, 0,19)	0,24 (0,13, 0,38)	0,48 (0,26, 0,76)
Reducción total del consumo de combustible en toda la flota				0,43 (0,22, 0,70)	0,86 (0,44, 1,40)	1,43 (0,73, 2,35)

4.5.5 Resultados de la optimización del perfil de vuelo

Tabla35: Implementación y ahorros derivados de mejoras horizontales en la eficiencia

Medida	Reducción del consumo de combustible en toda la flota (%)		
	2030	2040	2050
Optimización del ascenso y descenso	0,06 (0,02, 0,09)	0,12 (0,06, 0,18)	0,18 (0,09, 0,27)
Eficiencia vertical en ruta	0,04 (0, 0,10)	0,28 (0,05, 0,58)	0,41 (0,11, 0,78)
Eficiencia horizontal	0,43 (0,22, 0,70)	0,86 (0,44, 1,40)	1,43 (0,73, 2,35)
Total	0,53 (0,24, 0,89)	1,26 (0,55, 2,16)	2,02 (0,93, 3,40)

Escenario ambicioso: LAC logra avances significativos mediante la armonización regulatoria, el despliegue tecnológico y la sólida colaboración entre los grupos de interés. Las aerolíneas aprovechan la adopción existente de las CCO y las CDO para mejorar la consistencia y optimizar los procedimientos mediante herramientas avanzadas de trayectoria, integración de datos en tiempo real y monitoreo del desempeño. Los gobiernos y los ANSP modernizan las estructuras del espacio aéreo, implementan procedimientos armonizados y habilitan los estándares de separación dinámica. Los aterrizajes con *flaps* reducidos se convierten en una práctica habitual cuando es viable desde el punto de vista operativo, con el apoyo de avisos digitales y entrenamiento. Los acuerdos regionales garantizan la coordinación transfronteriza, y la alineación cultural fomenta la transparencia y la responsabilidad compartida. Estos esfuerzos combinados permiten reducir considerablemente el consumo de combustible y las emisiones, al tiempo que mejoran la previsibilidad y la resiliencia.

Escenario moderado: El progreso es constante, pero desigual. Las aerolíneas aumentan el uso de procedimientos optimizados de ascenso y descenso y reducen los aterrizajes con *flaps*, pero su adopción varía según el aeropuerto y el Estado. La modernización del espacio aéreo avanza gradualmente, con la implantación parcial del Espacio Aéreo de Ruta Libre y la adopción limitada de herramientas de separación dinámica. La toma de decisiones colaborativa y el monitoreo del desempeño mejoran el cumplimiento, pero el intercambio de datos sigue siendo inconsistente. Los marcos de trabajo regulatorios evolucionan lentamente y los incentivos financieros son limitados, lo que impide que se materialicen algunas ganancias de eficiencia.

Escenario conservador: La adopción sigue siendo mínima debido a la débil acción regulatoria, la inversión limitada y la gobernanza fragmentada. Las aerolíneas mantienen las prácticas actuales con algunas mejoras progresivas en el uso de las CCO y las CDO. Los conceptos avanzados de gestión del tráfico aéreo, como la separación dinámica y la entrega optimizada en pista, siguen prácticamente ausentes. La modernización del espacio aéreo es lenta, con ineficiencias estructurales persistentes y una coordinación transfronteriza limitada. Las barreras culturales e institucionales impiden una colaboración significativa, lo que se traduce en un ahorro marginal de combustible y en una brecha cada vez mayor entre LAC y las mejores prácticas globales.

4.6 Resultados y discusión

Los resultados de este estudio, tal y como se muestran en la siguiente tabla, demuestran que las medidas de eficiencia operativa pueden generar reducciones sustanciales de combustible y emisiones en LAC. Para 2050, el impacto combinado de las medidas adoptadas por las aerolíneas, en tierra y en vuelo podría suponer un ahorro de combustible de hasta el 11,3 %. Las operaciones en tierra representan la mayor oportunidad, seguidas de la optimización del perfil de vuelo, mientras que las medidas a nivel de las aerolíneas proporcionan

ganancias menores, pero, aun así, importantes. Estos ahorros potenciales no implican que las aerolíneas puedan absorber los costos asociados, ya que la mayoría de las medidas requieren inversiones de todos los grupos de interés y marcos de trabajo regulatorios favorables.

Tabla36: Resultados de la reducción del consumo de combustible en toda la flota, en comparación con la referencia de 2019

Medida	Reducción del consumo de combustible en toda la flota (%)		
	2030	2040	2050
Medidas de eficiencia y planificación de aeronaves	0,5 (0,2, 1,0)	0,9 (0,5, 1,5)	1,4 (0,6, 2,4)
Operaciones aeroportuarias y terrestres	0,9 (0,3, 1,6)	2,4 (1,0, 4,2)	3,4 (1,7, 5,5)
Optimización del perfil de vuelo	0,5 (0,2, 0,9)	1,3 (0,6, 2,2)	2,0 (0,9, 3,4)
Total	1,9 (0,8, 3,5)	4,6 (2,0, 7,8)	6,8 (3,3, 11,3)

Para aprovechar este potencial se necesitan más que soluciones técnicas. Depende de la acción coordinada entre gobiernos, reguladores, aerolíneas, aeropuertos y proveedores de tecnología, respaldada por incentivos alineados, inversiones focalizadas y una cultura de colaboración.

Alineación regulatoria e incentivos: La regulación debe crear un entorno en el que las medidas de eficiencia sean viables y atractivas. Esto incluye armonizar procedimientos entre países, establecer estándares operativos claros y alinear los incentivos financieros con los objetivos medioambientales y de desempeño. Las estructuras de incentivos deben recompensar el cumplimiento y la innovación, al tiempo que garantizan que los mandatos vayan de la mano de medidas facilitadoras, como mejoras de la infraestructura y de entrenamiento. Los gobiernos también pueden incluir requisitos de infraestructura en los contratos para garantizar que los nuevos acuerdos aborden las capacidades necesarias para lograr ganancias de eficiencia.

Inversión e infraestructura: Estas inversiones requieren responsabilidades compartidas entre todos los grupos de interés. Los gobiernos pueden proporcionar apoyo normativo y acceso a financiación ecológica, los aeropuertos y los proveedores de servicios de navegación aérea deben dar prioridad a la mejora de las infraestructuras, y las aerolíneas deben comprometerse mediante acuerdos a largo plazo que justifiquen estas inversiones. Los bancos de desarrollo y las instituciones financieras tienen un papel importante en la reducción de las barreras de capital y en garantizar una distribución equitativa de los costos.

Compromisos de las aerolíneas y los aeropuertos: Las aerolíneas y los aeropuertos deben seguir aplicando estas medidas. Las aerolíneas deben seguir integrando en sus SOP procedimientos optimizados de ascenso y descenso, aterrizajes con *flaps* reducidos y rodaje eficiente, con el apoyo de entrenamiento y monitoreo del desempeño. Los aeropuertos deben complementar estos esfuerzos aumentando la infraestructura, implementando la toma de decisiones colaborativa e integrando herramientas de optimización en tiempo real para la secuenciación de pistas y la gestión de salidas.

Tecnología e integración de datos: La digitalización es un factor habilitador fundamental. El intercambio de datos en tiempo real entre los grupos de interés facilita la toma colaborativa de decisiones, la gestión del flujo y la optimización de los perfiles de vuelo. El monitoreo del desempeño y los bucles de retroalimentación, respaldados por KPI claros, pueden impulsar la mejora continua. Los proveedores de tecnología deben garantizar la interoperabilidad y la escalabilidad para hacer posible la adopción regional.

Cambios de cultura y de comportamiento: La tecnología y la regulación por sí solas no darán resultados sin una cultura de colaboración. Las aerolíneas, los aeropuertos y los ANSP deben considerar la eficiencia como una responsabilidad compartida y no como una ventaja competitiva. Esto requiere un intercambio

transparente de datos, evaluaciones conjuntas del rendimiento y la voluntad para adaptar las prácticas operativas. Los programas de comportamiento, como la retroalimentación de los pilotos y el establecimiento de objetivos, han demostrado su eficacia en otras regiones y deberían ampliarse en LAC.

Coordinación y gobernanza regionales: La fragmentación sigue siendo un obstáculo importante. Se deben aprovechar las plataformas regionales para armonizar los procedimientos, compartir las mejores prácticas y coordinar las inversiones. Los acuerdos estructurados entre las autoridades civiles y militares pueden desbloquear capacidades adicionales en el espacio aéreo, mientras que la comparación de puntos de referencia e informes transparentes pueden mantener la responsabilidad. Vincular las mejoras en la eficiencia con los objetivos medioambientales también puede desbloquear la financiación climática y reforzar los argumentos económicos a favor de una reforma.

4.7 Pronóstico de línea base de combustible de aviación

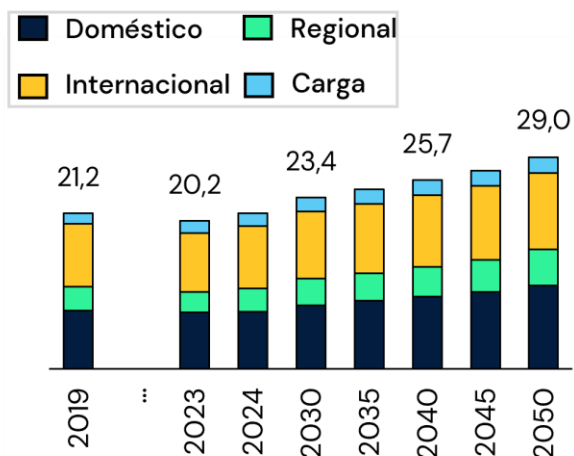
ICF estimó la línea base de suministro de combustible utilizando los niveles de actividad históricos combinados con la base de datos de consumo de combustible de la OACI. Luego, se elaboraron proyecciones futuras utilizando el pronóstico de la actividad analizada en la sección 2 de este informe, junto con el pronóstico de renovación de flota y de mejoras en la eficiencia operativa descritas en las secciones anteriores.

En 2019, ICF estimó que todos los vuelos que partieron de LAC consumieron un total de 21,2 Mt de combustible de aviación, según la base de datos de consumo de combustible de la OACI. En 2023, el suministro de combustible experimentó un ligero descenso, ya que el número de ATM se mantuvo ligeramente por debajo de los niveles de 2019 y las aerolíneas retiraron o reemplazaron las aeronaves de vieja generación por modelos más nuevos y eficientes en cuanto al consumo de combustible durante la pandemia de COVID. Para 2050, ICF pronostica que el suministro de combustible alcanzará los 29,0 Mt, lo que representa una CAGR del 1,0 % entre 2019 y 2050. En comparación con la CAGR pronosticada del 2,7 % en el aumento del tráfico para el mismo período, esto muestra las continuas mejoras en la eficiencia impulsadas por la renovación de flota y las medidas operativas. Sin estas medidas, se prevé que el suministro de combustible alcance los 44,5 millones de toneladas en 2050. Aunque las actividades domésticas representan aproximadamente el 70 % de los ATM, solo suponen el 39 % de las necesidades de combustible pronosticadas debido a que las distancias entre sectores son más cortas. Las actividades regionales e internacionales representan aproximadamente el 17 % y el 36 %, respectivamente, mientras que la carga representa el 8 % restante.

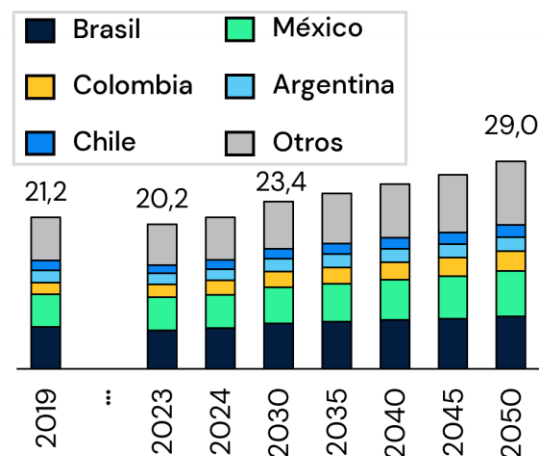
Para 2050, se pronostica que los cinco países principales representarán casi el 70 % del suministro de combustible de la región: Brasil con un 25 %, México con un 22 %, Colombia con un 10 %, Argentina con un 7 % y Chile con un 6 %. Esta distribución sigue siendo coherente con los niveles de 2019. Las siguientes gráficas y tablas resumen los resultados de los pronósticos de suministro de combustible para estos países objetivos y para la región en su conjunto.

Pronóstico de suministro de combustible por tipo de mercado (izq.) y división de país (der.)

Suministro de combustible por tipo de mercado (Mt)



Suministro de combustible por país (Mt)



Fuente: análisis de ICF.

Tabla37: Resumen del pronóstico de suministro de combustible en LAC por países objetivos

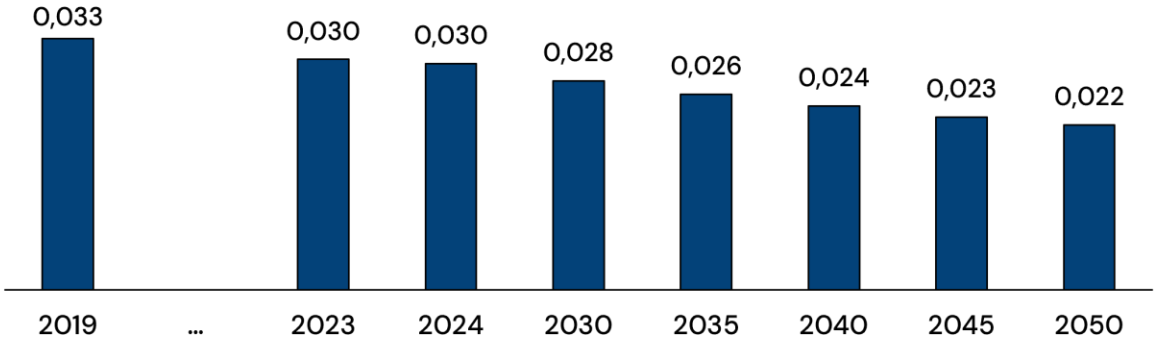
País objetivo	Combustible 2019 (Mt)	Combustible 2035 (Mt)	Combustible 2050 (Mt)	Cuota de suministro de combustible en 2019	Cuota de suministro de combustible en 2050	CAGR 2019-2050
Brasil	5,9	6,6	7,4	28%	25%	0,7%
México	4,6	5,3	6,3	22%	22%	1,0%
Colombia	1,6	2,3	2,8	8%	10%	1,7%
Argentina	1,7	1,9	2,0	8%	7%	0,4%
Chile	1,4	1,5	1,7	6%	6%	0,7%
Perú	1,2	1,2	1,5	6%	5%	0,7%
Panamá	0,7	0,9	1,3	3%	5%	2,2%
República Dominicana	0,6	1,0	1,5	3%	5%	3,0%
Ecuador	0,4	0,4	0,5	2%	2%	0,5%
Bahamas	0,1	0,1	0,1	1%	0%	0,4%
El Salvador	0,2	0,2	0,3	1%	1%	1,4%
Otros	2,9	3,1	3,7	14%	13%	0,8%
Total ALTA	21,2	24,5	29,0	100%	100%	1,0%

En 2019, el consumo de combustible por RPK se estimó en aproximadamente 0,033 kg de combustible de aviación por RPK. Esta cifra se redujo a aproximadamente 0,030 kg por RPK en 2023, ya que las aerolíneas implementaron aeronaves más eficientes en cuanto al consumo de combustible y mejoraron sus prácticas operativas después de la COVID. La métrica siguió disminuyendo en 2024, lo que muestra nuevas transiciones de flota y la recuperación de las operaciones de larga distancia. Se espera que el consumo de combustible por RPK siga mejorando a lo largo del período de proyección, hasta alcanzar alrededor de 0,022 kg por RPK en 2050. Esta mejora está impulsada principalmente por la evolución de las tecnologías aeronáuticas, ya que se espera que las aeronaves de nueva generación representen casi el 80 % de los ASK de la región a mediados

de 2035. La siguiente figura ilustra el pronóstico de evolución de consumo de combustible por RPK en determinados años.

Se pronostica que la renovación de la flota y las mejoras operativas tengan como resultado una ganancia en eficiencia del 1,3% (CAGR) entre 2019 y 2050 en LAC

Consumo de combustible (kg) por RPK

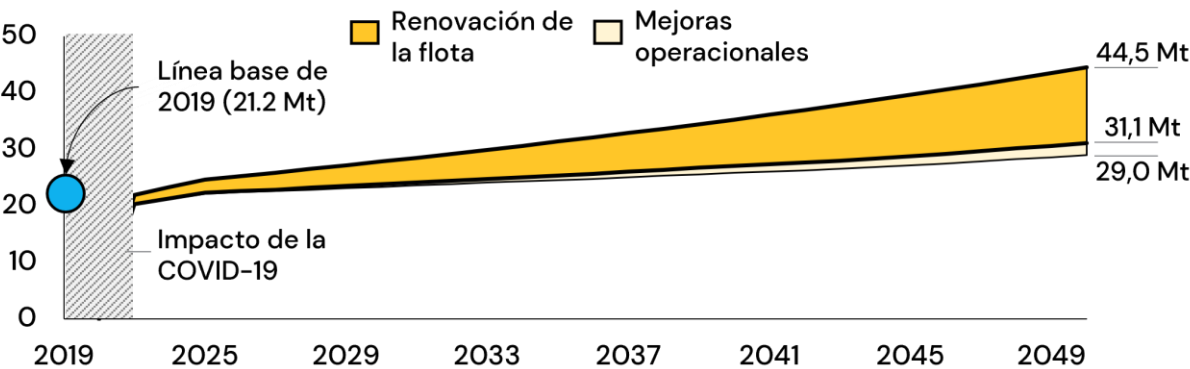


Fuente: análisis de ICF.

Se pronostica que el suministro de combustible crezca a una CAGR del 1,0 % entre 2019 y 2050. Este crecimiento está impulsado por una combinación de la densificación de las cabinas y la evolución de la tecnología aeronáutica, que se espera que reduzca el consumo de combustible en aproximadamente un 30 % en comparación con los niveles de hoy en día. Esto concuerda con las observaciones actuales de que cada nueva generación de aeronaves ofrece un ahorro de combustible de entre el 15 % y el 20 %. Además, se prevé que las mejoras operativas reduzcan las necesidades de combustible en un 6,8 % adicional para 2050. La siguiente gráfica ilustra el pronóstico de suministro de combustible y la contribución de la renovación de flota y las mejoras operativas al ahorro de combustible.

Se prevé que la renovación de la flota y las eficiencias operativas reduzcan el consumo de combustible en un 35% en 2050. Se necesitan medidas adicionales para llegar a emisiones netas cero

Repostaje de combustible (Mt)



Fuente: análisis de ICF.

5 Evaluación de oportunidades y obstáculos para SAF en Latinoamérica y el Caribe



Resultados claves:

- Se ha anunciado una capacidad de producción de SAF de más de 1900 millones de galones en toda LAC; sin embargo, aún no se ha producido SAF en la región y ningún proyecto ha alcanzado la decisión final de inversión (FID) (a noviembre de 2025). También es importante señalar que la capacidad anunciada no implica que se traduzca plenamente en capacidad operativa, como se ha visto en numerosas cancelaciones de instalaciones a nivel global.
- El proceso HEFA sigue siendo la ruta más viable comercialmente hoy en día, pero su escalabilidad se ve limitada por la disponibilidad de materia prima. AtJ ofrece un mayor potencial a largo plazo a medida que aumenta la disponibilidad de materia prima.
- Las preocupaciones sobre la sostenibilidad en relación con el origen y el cultivo de las materias primas siguen siendo una barrera importante y deben abordarse para que los SAF puedan contribuir de manera significativa. Es importante que la producción de SAF no se haga a expensas del cambio en el uso del suelo, la seguridad alimentaria, la naturaleza y el agua, ya que más de dos tercios de las emisiones en Brasil y Colombia provienen del sector de Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra (AFOLU).
- Se espera que los precios de SAF se mantengan significativamente por encima de los precios del combustible fósil para aviones hasta 2050 (entre 3 y 12 veces más altos), incluso con la continua maduración de la tecnología y la producción a gran escala. Los costos de abatimiento varían según la vía tecnológica, pero disminuyen significativamente con el tiempo. Para 2050, se prevé que las rutas AtJ tendrán los costos de abatimiento más bajos en general, siendo el etanol de caña de azúcar AtJ la opción más rentable, con un costo aproximado de 417 USD/tCO₂.

5.1 Oportunidades y retos para SAF en LAC

El Combustible Sostenible de Aviación (SAF) es la medida «intrasectorial» con mayor potencial teórico a largo plazo para descarbonizar la aviación con la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero durante el ciclo de vida en comparación con el combustible de aviación convencional (CAF). Como combustible de sustitución “*drop-in*”, los SAF pueden utilizarse en las flotas e infraestructuras existentes sin necesidad de modificaciones, lo que facilita su integración.

Sin embargo, el despliegue a gran escala en LAC, y a nivel global, enfrenta retos técnicos, económicos y regulatorios, entre los que se incluyen:

- La disponibilidad de materia prima suficiente y sostenible;
- inversiones en la cadena de suministro, la producción y la infraestructura de distribución;
- limitación de las oportunidades de exportación desde LAC a otras regiones debido a los criterios de elegibilidad de las materias primas en los distintos marcos de trabajo regulatorios, y
- superar la considerable diferencia de precio con respecto a los combustibles convencionales (el precio de SAF es entre 3 y 12 veces superior), lo que podría incrementar el precio de los tiquetes aéreos y reducir la conectividad.

En conjunto, estos retos han obstaculizado la adopción de SAF, a pesar de los esfuerzos continuos del ecosistema aeronáutico global y regional.

En este informe se analiza la situación actual del mercado de SAF en LAC, se identifican los retos claves para la región y se destacan las oportunidades para el desarrollo del mercado.

¿Qué son los SAF?

Los SAF son un sustituto para el combustible convencional para aviones que logra menores emisiones de carbono. El combustible sostenible de aviación (SAF) es un sustituto de menor carbono del combustible de aviación convencional. Se puede fabricar utilizando una variedad de materias primas, tales como:

- Cultivos como caña de azúcar o semillas oleaginosas.
- Desechos y residuos de la agricultura, la silvicultura o los municipios.
- CO₂ capturado combinado con hidrógeno renovable (o no fósil y bajo en carbono)

Los combustibles de aviación con bajas emisiones de carbono (LCAF) son combustibles de aviación derivados de combustibles fósiles que logran reducciones verificadas de las emisiones a lo largo de su ciclo de vida reduciendo las emisiones a lo largo de la cadena de suministro. Esto puede incluir procesos de producción mejorados, transporte, reducción de la quema de gas y de las emisiones de metano, así como la incorporación de tecnologías como la captura y el almacenamiento de carbono (CCS/CCUS). El LCAF como solución aún sigue en fase de desarrollo, y se necesita más información para comprender su potencial como mecanismo de descarbonización.

Tanto los SAF como los LCAF son combustibles de sustitución «*drop-in*», lo que significa que pueden utilizarse en la infraestructura logística y en las aeronaves existentes sin necesidad de modificaciones, una vez mezclados con el combustible convencional para aviones.

Componentes sintéticos de mezcla

Los componentes sintéticos para mezclas (SBC) son componentes de combustible producidos en instalaciones especializadas y con el fin de mezclarse con combustible convencional para aviones para producir SAF. Deben cumplir con las especificaciones ASTM D7566¹⁹⁸ para garantizar un funcionamiento seguro en aeronaves. Actualmente, los SBC pueden mezclarse hasta al 50 %¹⁹⁹ dependiendo de la ruta de producción, y se están realizando investigaciones para alcanzar el 100 % en 2030. La mezcla se realiza en las terminales de producción o distribución y no debe realizarse en el depósito de combustible del aeropuerto²⁰⁰.

Coprociamiento

Algunos materiales renovables, como los lípidos, pueden ser coprocesados en refinerías convencionales modificadas. En este enfoque, la materia prima renovable se introduce durante el refinado. Hoy en día, los lípidos pueden coprocesarse hasta un 5 % del producto final, mientras que las materias primas derivadas del proceso HEFA pueden coprocesarse hasta un 10 %²⁰¹. El coprociamiento permite aumentar la producción de SAF sin necesidad de instalaciones independientes dedicadas.

5.2 Marcos de trabajo de políticas de SAF a nivel global: OACI y el CORSIA

En un contexto global, los esfuerzos para mitigar las emisiones de carbono en el sector de la aviación han sido impulsados por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), principalmente a través de CORSIA. CORSIA es un marco de trabajo global cuyo objetivo es lograr un crecimiento neutro en carbono en la aviación internacional entre 2021 y 2035 (con posibilidad de prórroga), utilizando como línea base el 85 % de las emisiones de 2019 de los vuelos entre los países participantes.

CORSIA apoya el Acuerdo de París al exigir a las aerolíneas que informen sobre sus emisiones y compensen el aumento de las emisiones del sector mediante la compra y cancelación de unidades de emisión. El uso de combustibles aptos para el CORSIA (CEF), que incluyen tanto SAF como LCAF, reduce los requisitos de compensación en la misma medida en que el combustible reduce la huella de carbono en comparación con el equivalente fósil.

El objetivo de emisiones netas cero para 2050 de la OACI (LTAG) va acompañado de una visión aspiracional global colectiva para lograr una reducción del 5 % en las emisiones de CO₂ de la aviación internacional para 2030 mediante el uso de CEF (CAAF/3). Al perseguir esta Visión, las circunstancias y capacidades especiales de cada Estado determinarán

¹⁹⁸ D7566 Especificación estándar para combustible de turbina de aviación que contiene hidrocarburos sintetizados

¹⁹⁹ <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Conversion-processes.aspx>

²⁰⁰ Según lo recomendado por JIG

²⁰¹ <https://www.icao.int/environmental-protection/saf-conversion-processes>

su contribución dentro de su propio marco temporal nacional, sin imponer obligaciones ni compromisos específicos a los Estados individuales.

La OACI también ha creado el programa ACT-SAF (Asistencia, Construcción de Capacidades y Entrenamiento en SAF) y la plataforma Finvest para apoyar la implementación de SAF a nivel global.

5.2.1 CORSIA

Los criterios de sostenibilidad establecidos en CORSIA son relevantes para LAC. Se le reconoce ampliamente en el contexto del CAAF/3 como una base relevante y los países de la región lo valoran como una base adecuada para desarrollar un marco de trabajo de SAF. Además, guiará el proceso para reclamar posibles reducciones de emisiones de los vuelos internacionales que operan en rutas sujetas al cumplimiento de CORSIA.

Para que el SAF sea considerado un combustible elegible para CORSIA (CEF), debe cumplir los criterios de sostenibilidad del CORSIA de la OACI²⁰², y los productores de combustible deben estar verificados por un Sistema de Certificación de Sostenibilidad (SCS) aprobado por la OACI²⁰³. Los criterios de sostenibilidad se estructuran en torno a los temas medioambientales, sociales y económicos que se muestran en la siguiente figura²⁰⁴. En general, para cumplir con los requisitos, SAF debe evitar o mitigar los impactos negativos significativos en estos temas y cumplir con los umbrales especificados. Estos requisitos se encuentran entre los más estrictos que se aplican hoy en día a cualquier biocombustible, lo cual muestra la intención del sector de establecer un alto nivel de transparencia.

Temas de sostenibilidad para los SAF del CORSIA



Fuente: OACI, análisis de ICF.

Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), reservas de carbono y permanencia de la reducción de GEI

El cumplimiento de los criterios de sostenibilidad de los gases de efecto invernadero y las reservas de carbono se evalúa con una metodología cuantitativa. De acuerdo con los criterios de sostenibilidad, los CEF deben lograr una reducción neta de las emisiones de GEI de al menos un 10 % en comparación con el valor de la línea base de las emisiones del

²⁰² Documento de la OACI titulado *CORSIA sustainability criteria for CORSIA eligible fuels*.

²⁰³ Documento 04 de la OACI: *CORSIA approved Sustainability Certification Schemes*.

²⁰⁴ El combustible de aviación con bajas emisiones de carbono del CORSIA tiene un criterio adicional relativo a los impactos sísmicos y vibratorios.

combustible de aviación convencional (89 gCO_{2e}/MJ) en todo su ciclo de vida. En la práctica, esto significa que el SAF debe tener una intensidad de carbono inferior a 80 gCO_{2e}/MJ para cumplir los criterios de sostenibilidad del CORSIA.

Las emisiones del ciclo de vida de los CEF deben calcularse según la metodología especificada e incluir un componente básico de análisis de ciclo de vida (LCA por sus siglas en inglés) y, cuando corresponda, un componente de cambio indirecto en el uso del suelo (ILUC por sus siglas en inglés). El componente principal del LCA refleja las emisiones asociadas directamente con la cadena de suministro de combustible, incluyendo la producción de materia prima, el acondicionamiento, el transporte y la conversión en combustible, así como el transporte, la distribución y, cuando corresponda, la combustión del combustible.

El valor ILUC refleja las emisiones indirectas asociadas a la conversión de tierras (por ejemplo, de bosques, pastizales, turberas o pérdidas de carbono del suelo) impulsadas por la producción de materias primas. También puede ser necesario tener en cuenta el cambio directo en el uso de la tierra (DLUC por sus siglas en inglés) cuando dicho cambio se haya producido después del 1 de enero de 2008. Este valor DLUC sustituye al valor ILUC al calcular las emisiones totales del ciclo de vida si las emisiones DLUC superan a las emisiones del ILUC.

Las emisiones totales durante el ciclo de vida de un determinado SAF pueden calcularse utilizando:

- Los valores predeterminados de emisiones durante el ciclo de vida de SAF publicados por la OACI en función de la materia prima, el proceso de conversión y la región de producción de SAF²⁰⁵.
- Valores reales calculados, siguiendo la metodología CORSIA adecuada²⁰⁶.

Los productores de CEF también pueden utilizar la captura y el secuestro geológico de carbono para reducir la intensidad de carbono de SAF. De acuerdo con el tema de la permanencia de la reducción de GEI, esto también está sujeto a los requisitos definidos por la OACI.

El cumplimiento de las emisiones de GEI, el almacenamiento de carbono y la permanencia de la reducción de GEI deben ser evaluados por un SCS aprobado.

Otros temas relacionados con la sostenibilidad

A diferencia de los temas relacionados con los GEI, las reservas de carbono y la permanencia de la reducción de GEI, los demás temas de sostenibilidad que están en la figura anterior son menos prescriptivos. La OACI los define de manera amplia y permite flexibilidad en su implementación a nivel estatal, lo que significa que:

- Los Estados individuales pueden ayudar a definir cómo se evalúa el cumplimiento de estos temas.
- Los SCS pueden adoptar reglas o directrices específicas de cada Estado para demostrar el cumplimiento.
- Por lo general, no existen umbrales cuantitativos equivalentes al requisito de reducción del 10 % de los GEI; en su lugar, el cumplimiento se basa en evitar o mitigar los impactos negativos inaceptables.

Como resultado, aunque estos temas son esenciales para garantizar la sostenibilidad general, son más cualitativos y dependen más del contexto que los temas relacionados con los GEI, y el rigor de su aplicación puede variar según la jurisdicción.

Materias primas y CORSIA

La OACI mantiene una lista positiva de materias primas que se consideran elegibles como parte del CORSIA²⁰⁷. Estas materias primas pueden clasificarse, en términos generales, en las categorías descritas en la Tabla 38, que también muestra ejemplos representativos de materias primas dentro de cada categoría. Se podrán añadir nuevas materias primas a la lista siguiendo el procedimiento definido por la OACI.

Si bien, en principio, cualquier materia prima que cumpla con los criterios de sostenibilidad del CORSIA podría utilizarse para producir CEF, la realidad tiene más matices. Las materias primas que requieren un valor ILUC y que actualmente no tienen un valor predeterminado adecuado especificado (es decir, que no figuran en la lista positiva) no pueden utilizarse para producir CEF hasta que se hayan establecido y añadido a la lista de la OACI de valores predeterminados del CORSIA, de conformidad con la metodología del CORSIA para calcular los valores reales de las emisiones durante el

²⁰⁵ Documento de la OACI titulado *CORSIA default life cycle emission values for CORSIA eligible fuels*.

²⁰⁶ Documento de la OACI titulado *CORSIA methodology for calculating actual life cycle emission values*.

²⁰⁷ Materias primas SAF.

ciclo de vida. Esto tiene implicaciones en la elegibilidad de las materias primas de LAC y se analiza con más detalle más adelante en el documento.

Tabla38: Categorías, definiciones y ejemplos representativos de materias primas del CORSIA

Categoría	Definición	Ejemplo representativo
Productos primarios y coproductos	Principales productos de un proceso de producción. Estos productos tienen un valor económico significativo y una oferta elástica.	<ul style="list-style-type: none"> • Caña de azúcar • Semilla oleaginosa de soya • Semilla oleaginosa de camelina
Subproductos	Productos secundarios con oferta inelástica y valor económico.	<ul style="list-style-type: none"> • Sebo
Residuos	Materiales secundarios con suministro inelástico y escaso valor económico.	<ul style="list-style-type: none"> • Bagazo, mazorcas, cáscaras • Residuos forestales
Desechos	Materiales con oferta inelástica y sin valor económico. Un desecho es cualquier sustancia u objeto que el poseedor elimina, tiene la intención de eliminar o está obligado a eliminar ²⁰⁸ .	<ul style="list-style-type: none"> • Desechos municipales del suelo • Aceite de cocina usado

Productos primarios

Los mercados de biocombustibles existentes en LAC dependen en gran medida de productos primarios (es decir, cultivos) como materia prima, por ejemplo, el etanol de caña de azúcar y el biodiésel de soya o palma. El aumento de la producción de estas materias primas derivadas de cultivos establecidas para SAF probablemente generará inquietudes en relación con muchos de los temas de sostenibilidad del CORSIA mencionados anteriormente, en particular el cambio en el uso del suelo y la seguridad alimentaria, además de otros impactos esperados en la naturaleza y el agua.

Además del CORSIA, existen esquemas voluntarios de sostenibilidad específicos para materias primas, como Bonsucro, que proporcionan orientaciones más detalladas y mecanismos de verificación para la producción responsable de materias primas. Estos esquemas se centran en minimizar el impacto medioambiental, mejorar los resultados sociales y aumentar la trazabilidad a lo largo de toda la cadena de suministro. Es posible que la certificación del cumplimiento de criterios tales como la gestión responsable del suelo, la eficiencia en el uso del agua y los estándares laborales ayude a mitigar los riesgos asociados con las materias primas derivadas de cultivos, incluyendo la deforestación, la pérdida de biodiversidad y la competencia con la producción de alimentos.

Cuando se ajustan a los requisitos del CORSIA, estos esquemas de certificación ofrecen a los productores una ruta para demostrar que su SAF cumple con las expectativas de sostenibilidad tanto regionales como internacionales, al tiempo que proporcionan confianza a los compradores y reguladores en cuanto a la integridad medioambiental y social de los combustibles. Hay que analizar con detenimiento este tipo de enfoques locales y nacionales, ya que existe el riesgo de limitar la capacidad de exportación de los SAF producidos en LAC a los mercados internacionales si la certificación doméstica no se ajusta a la utilizada en los mercados extranjeros.

Desechos, residuos y subproductos

Las materias primas derivadas de desechos, residuos y subproductos son una alternativa de menor riesgo que los cultivos primarios para la producción de SAF. Estos materiales, como el aceite de cocina usado, el bagazo de caña de azúcar, los residuos forestales o los subproductos agrícolas, suelen tener un impacto mínimo en el cambio del uso del suelo y no compiten directamente con la producción de alimentos. Sin embargo, el cumplimiento de los criterios de sostenibilidad del CORSIA sigue dependiendo de procesos adecuados de abastecimiento, procesamiento y de cálculo de las emisiones durante el ciclo de vida.

Los programas de certificación de sostenibilidad, entre los que se incluyen la Certificación Internacional de Sostenibilidad y Carbono (ISCC) y la Mesa Redonda sobre Biomateriales Sostenibles (RSB), proporcionan orientación para su recolección, procesamiento y trazabilidad, lo que ayuda a garantizar el mantenimiento de las salvaguardias medioambientales y sociales a lo largo de toda la cadena de suministro. El uso de estas materias primas para la producción de SAF podría permitir a los productores de LAC aprovechar los flujos de residuos existentes, reducir las

²⁰⁸ Las materias primas o sustancias que hayan sido modificadas o contaminadas intencionalmente para ajustarse a esta definición no están incluidas en la misma.

emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y suministrar SAF que cumplan con los requisitos internacionales de sostenibilidad, al tiempo que mitigan muchos de los riesgos asociados a las materias primas derivadas de cultivos, siempre que se demuestre el cumplimiento de los criterios de CORSIA.

Resumen

Hoy en día, los criterios de sostenibilidad de CORSIA proporcionan el marco de trabajo internacional más relevante para evaluar el SAF. Los criterios de CORSIA establecen tanto umbrales cuantitativos, como los requisitos de reducción de GEI durante el ciclo de vida, como temas cualitativos más amplios relacionados con el uso de la tierra, los ecosistemas y las salvaguardias sociales.

5.3 Industria y políticas de SAF en LAC

5.3.1 Políticas y desarrollo del mercado de SAF

Es esencial contar con políticas predecibles, coherentes y sólidas para apoyar el desarrollo de la industria de SAF y permitir su uso como parte del logro de los objetivos de sostenibilidad a largo plazo. Al proporcionar orientación e incentivos claros para productores y pasajeros, los responsables de las políticas pueden estimular la inversión, aumentar el acceso a materias primas sostenibles e impulsar la reducción de costos y compensar la diferencia de precios, facilitando una adopción más amplia de SAF. Si bien los altos costos de producción, la disponibilidad limitada de materias primas para el SAF basados en el proceso HEFA, ineficiencias en la cadena de suministro y la competencia por los recursos plantean desafíos, los marcos regulatorios bien diseñados pueden ayudar a limitar el efecto de dichas barreras y facilitar la adopción progresiva de SAF.

Estas políticas están comenzando a desarrollarse en toda LAC, aunque en general se encuentran en una fase muy temprana. Las siguientes secciones resumen el panorama de SAF en toda LAC.

5.3.1.1 Argentina

En el Plan de Acción Estatal de Argentina presentado a la OACI en 2021²⁰⁹, se señala que la migración hacia el SAF es uno de los efectos esperados del impuesto sobre el CO₂, que comenzó a aplicarse a los combustibles de aviación en 2021. Aparte de esta medida, actualmente no existen políticas nacionales específicas que promuevan o incentiven la implementación de SAF, aunque se están llevando a cabo varias iniciativas de investigación y viabilidad. El Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) ha llevado a cabo investigaciones sobre tecnologías de bioenergía que podrían apoyar la producción de SAF. En 2025, Airbus y la OACI anunciaron una alianza para realizar estudios de viabilidad sobre el SAF en Argentina, así como en Perú y Panamá, como parte del programa ACT-SAF de la OACI²¹⁰.

5.3.1.2 Bahamas

El SAF se incluye dentro del conjunto de medidas que se espera que contribuyan a reducir las emisiones de CO₂ de la aviación en el Plan de Acción Estatal de las Bahamas, presentado a la OACI en 2022²¹¹; sin embargo, hoy en día no existen políticas nacionales específicas ni incentivos para facilitarlos. El Banco Interamericano de Desarrollo (BID) ha puesto en marcha un proyecto de cooperación técnica cuyo objetivo es prestar apoyo a la aviación sostenible en las Bahamas, lo que incluye el desarrollo de una estrategia de aviación sostenible y la realización de estudios para respaldar la adopción de SAF²¹².

5.3.1.3 Brasil

La ley brasileña «Combustible del futuro» establece el Programa Nacional para la Aviación Sostenible (ProBioQAV), que exige a las aerolíneas reducir las emisiones de CO₂ principalmente mediante el uso de SAF en vuelos domésticos, en lugar de imponer un porcentaje volumétrico de mezcla de SAF.

Esta ley se estableció en 2024 y exige que los operadores aéreos reduzcan sus emisiones en vuelos domésticos, comenzando con una reducción del 1 % en 2027 e incrementando hasta llegar a una reducción del 10 % en 2037. Sin

²⁰⁹ Plan de Acción para la Reducción de Emisiones de CO₂ en el sistema de transporte argentino - Final.

²¹⁰ <https://www.aviacionline.com/airbus-and-icao-partner-to-study-sustainable-aviation-fuel-feasibility-in-argentina-panama-and-peru>

²¹¹ The Bahamas Action plan for Emissions reduction (APER).

²¹² <https://www.iadb.org/en/project/BH-T1130>

embargo, las regulaciones que definen los detalles de la implementación aún se están debatiendo y aún no se ha resuelto el impacto negativo esperado sobre la conectividad.

Las aerolíneas están participando y colaborando con el gobierno en una serie de mesas redondas para identificar soluciones que permitan compatibilizar este objetivo con el importante impacto en los costos que se prevé para las aerolíneas²¹³. Esto podría incluir mecanismos de apoyo a los precios para mitigar los efectos negativos sobre la conectividad esencial que proporcionan las aerolíneas en el país.

Desde el punto de vista de la sostenibilidad de SAF, la ley sobre el combustible del futuro exige una intensidad de carbono al menos un 10 % inferior a la del combustible convencional para aviones. Además, esta ley fomenta el uso de las rutas de producción de SAF más eficientes en términos de carbono²¹⁴ .²¹⁵ .

A partir de 2027, Brasil se incluirá como uno de los países de la lista de pares de Estados en la Fase 2 de CORSIA (obligatoria). Esto significará que las emisiones internacionales de los operadores brasileños que superen el 85 % de los niveles observados en 2019 deberán compensarse mediante la adquisición de créditos de carbono o el uso de combustibles elegibles bajo CORSIA²¹⁶. Brasil también está desarrollando su propio mercado de carbono, en el que el SAF y los créditos de carbono son medidas complementarias.

En agosto de 2024, el Gobierno brasileño anunció un paquete de financiación de 1.090 millones de dólares para apoyar el desarrollo de SAF y biocombustibles marinos²¹⁷. Esta iniciativa, financiada por el Banco Nacional de Desarrollo Económico y Social (BNDES) y la Financiadora de Estudios y Proyectos (FINEP), está asignando fondos a través de convocatorias de propuestas dirigidas a:

- Construcción de biorrefinerías
- Investigación y desarrollo
- Proyectos de ingeniería y proyectos piloto
- Adquisición de equipos y capital de trabajo

Sin embargo, todos los incentivos y la financiación se destinan actualmente a apoyar la producción de SAF, sin que existan en la actualidad ayudas ni incentivos para la demanda de dichos combustibles. Las aerolíneas nacionales brasileñas están colaborando con el Gobierno y las partes interesadas para garantizar que se apliquen medidas de apoyo a los pasajeros domésticos y se aborde la diferencia de precios, con el fin de evitar la reducción prevista del tráfico aéreo dentro de Brasil debido al mayor costo de SAF²¹⁸.

Además de ser una medida clave de reducción de emisiones para la aviación, los SAF se consideran importantes para el sector agrícola en Brasil. También son estratégicos desde el punto de vista agroindustrial. Sin embargo, es importante señalar que más de dos tercios de las emisiones en Brasil se originan del sector AFOLU²¹⁹.

5.3.1.4 Chile

El programa Vuelo Limpio, un esfuerzo público-privado que promueve la eficiencia energética, las mejoras operativas y la adopción de SAF, es fundamental para los esfuerzos de Chile por reducir las emisiones de la aviación. El programa colabora con las principales aerolíneas, aeropuertos y distribuidores de combustible para monitorear las emisiones, implementar las mejores prácticas y desarrollar una Hoja de Ruta de SAF 2050. Esta Hoja de Ruta aspira a satisfacer al menos el 50 % de la demanda de combustible para la aviación civil con SAF para 2050 y cuenta con el apoyo de una coalición de más de 90 instituciones. Chile busca hacer realidad

²¹³ Teniendo en cuenta que el costo de producción de SAF es al menos el doble del precio de venta del combustible para aviones y que el combustible representa entre el 30 % y el 40 % de los costos operativos en la región, según datos de ALTA.

²¹⁴ https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2025/Envreport2025_50.pdf

²¹⁵ <https://www.argusmedia.com/en/news-and-insights/latest-market-news/2674362-brazil-saf-industry-set-to-take-off-in-2027>

²¹⁶ <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/meio-ambiente/corsia>

²¹⁷ <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/imprensa/noticias/conteudo/bndes-e-finep-disponibilizam-6-bilhoes-de-reais-para-investimentos-em-combustivel-verde-para-aviacao-e-navegacao>

²¹⁸ Según retroalimentación de grupos de interés en el proyecto.

²¹⁹ Según retroalimentación de grupos de interés en el proyecto; AFOLU = Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra.

esta ambición a partir de grandes plantas que utilizan aceites, grasas y residuos biológicos y municipales, así como e-fuels²²⁰.

En el ámbito de la investigación, la Unidad de Desarrollo Tecnológico (UDT) de la Universidad de Concepción produjo el primer litro de combustible de aviación a partir de plásticos residuales en Chile²²¹ y también está llevando a cabo investigaciones sobre el uso de la camelina como cultivo sostenible para el SAF.

La Universidad Católica de la Santísima Concepción, a través de su Centro de Energía (UCSC) y SKY, ha explorado un proyecto de investigación y desarrollo centrado en la producción de SAF a partir de aceite de camelina, utilizando una biorrefinería experimental. Esta iniciativa se encuentra en una fase inicial y supone el primer acuerdo entre la industria y el sector científico del país centrado en la producción de SAF renovable de origen local²²².

5.3.1.5 Colombia

En enero de 2025, Colombia firmó la Resolución 00090, por la cual se establece una hoja de ruta de SAF. Esta establece el objetivo de que Colombia se convierta en líder regional en la producción de SAF, con una producción de 100 millones de galones de SAF para 2035, que aumentará hasta llegar a los 450 millones de galones para 2050²²³. La hoja de ruta se centra en tres pilares: la reducción de emisiones en el sector, el desarrollo de una industria productiva y sostenible, y la transformación social y la inclusión. Estos se apoyan en cinco ejes transversales: facilitadores jurídicos y regulatorios; promoción de la oferta y la demanda; despliegue de la cadena de suministro, desarrollo tecnológico, educativo e industrial, y financiación e inversiones. En particular, las aerolíneas han participado en debates sobre el uso de SAF, así como en el desarrollo de la legislación y los marcos regulatorios para su implementación. Ecopetrol, la empresa petrolera estatal de Colombia, ha identificado el coprocesamiento y la producción dedicada de SAF como una de las muchas iniciativas renovables focalizadas para una posible inversión y ha producido los primeros lotes piloto de combustible de aviación coprocesado en el país. También es un promotor activo de los proyectos de SAF, aunque hasta la fecha no ha confirmado ni financiado ninguno.

En 2024, Ecopetrol realizó una prueba industrial en su refinería de Cartagena, produciendo 32,000 barriles de combustible de aviación coprocesado con aceites vegetales. Sin embargo, el combustible producido no cumplía con los estándares de sostenibilidad. Aunque aún no cuenta con la certificación completa de la OACI, este combustible supone un primer paso hacia la posible producción futura de SAF, prevista para 2028²²⁴. A pesar de que esta fase de pruebas ha concluido, aún están pendientes la decisión final sobre la inversión y todos los permisos reglamentarios necesarios para las mejoras propuestas en las instalaciones de la refinería existente, que permitirían la producción a escala comercial²²⁵.

5.3.1.6 República Dominicana

El 24 de abril de 2023, la República Dominicana lanzó su «Declaración de Santo Domingo», un compromiso nacional para fomentar el despliegue y el uso de SAF²²⁶. Esta iniciativa establece una hoja de ruta clara para descarbonizar el sector de la aviación del país, basándose en hitos anteriores como la Declaración de Punta Cana de 2016 y un estudio de viabilidad de 2018²²⁷ sobre SAF. La declaración representa un enfoque gubernamental unificado, en el que participan ministerios claves y autoridades aeronáuticas para encabezar esta transición ecológica.

La hoja de ruta establecida describe objetivos específicos a corto y mediano plazo. Para 2023, la atención se centró en crear marcos de trabajo colaborativos y en compartir información para identificar y superar las barreras iniciales para la implementación de SAF. De cara al período 2024-2026, el plan incluye una revisión exhaustiva del marco jurídico y regulatorio, centrada específicamente en la Ley de Incentivos a las Energías Renovables, con el fin de crear un entorno

²²⁰ https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2025/Envreport2025_70.pdf

²²¹ <https://vuelolimpio.cl/2025/08/19/hito-udec/>

²²² <https://ucsc.cl/medios-ucsc/noticias/sky-y-ucsc-desarrollan-proyecto-para-producir-combustible-sostenible-de-aviacion-en-chile/>

²²³ El futuro ecológico de la aviación en Colombia: Hoja de ruta hacia los combustibles sostenibles.

²²⁴ https://www.icao.int/SAM/Documents/2025-RAAC18/RAAC18_WP34_Environment_SAF.pdf

²²⁵ <https://www.ogj.com/refining-processing/refining/optimization/article/55241583/ecopetrol-wraps-testing-for-saf-production-at-cartagena-refinery>

²²⁶ <https://www.idac.gob.do/es/instituciones-suscriben-declaracion-de-santo-domingo-un-compromiso-para-promover-uso-de-energia-limpia-en-la-aviacion/>

²²⁷ https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/environmental-protection/Documents/FeasibilityStudy_DomRep_ENG_Web.pdf

favorable para la producción, la logística y la adopción de combustibles sostenibles, posicionando al país como líder regional en aviación sostenible.

Actualmente, República Dominicana ya está apoyando la ampliación de SAF, ofreciendo incentivos para los combustibles alternativos a través de la Ley 57-07, que establece exenciones fiscales para los proyectos de energía renovable.²²⁸

5.3.1.7 Ecuador

Ecuador no cuenta con políticas ni legislación relacionadas con SAF. Sin embargo, cabe mencionar que el SAF se ha identificado como una oportunidad clave, y las materias primas potenciales que están considerando en esta fase son la caña de azúcar, el aceite de palma y los residuos sólidos urbanos (RSU)²²⁹.

5.3.1.8 El Salvador

El Salvador reconoce en su Plan de Acción Estatal que, aunque los SAF son un instrumento clave para la reducción de emisiones de la aviación, el principal reto sigue siendo garantizar un amplio compromiso de las distintas partes interesadas con su desarrollo²³⁰.

5.3.1.9 México

El Plan México (publicado en enero de 2025) incluye los SAF como prioridad nacional. La Ley de Biocombustibles, promulgada en marzo de 2025, junto con sus futuras regulaciones de aplicación (en redacción al momento este informe), tiene como objeto establecer criterios claros e inclusivos, acordes con los estándares internacionales, para la producción y certificación de SAF, y promover el uso y la comercialización de biocombustibles²³¹. Se han creado grupos de trabajo interinstitucionales (AFAC, ASA, SEMARNAT, SENER, CONADESUCA, SADER, SICT) para armonizar políticas, validar datos y definir criterios de sostenibilidad y certificación. La Agencia Federal de Aviación Civil de México (AFAC) también está liderando el desarrollo de una hoja de ruta nacional para SAF, en colaboración con la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), las aerolíneas y CANAERO. Se espera que esta hoja de ruta se publique en 2026. El documento describirá las medidas clave, entre las que se incluyen la investigación y el desarrollo, los incentivos económicos, los marcos de trabajo regulatorios, las directrices en materia de infraestructuras y los criterios de sostenibilidad para las materias primas, con el fin de evitar repercusiones negativas en la seguridad alimentaria y el medio ambiente²³².

La Ley de Biocombustibles tiene por objeto promover los desechos (economía circular) y los cultivos energéticos cultivados en tierras marginales, garantizando que no se interfiera con la soberanía y la seguridad alimentaria. Se está considerando la colaboración con las autoridades forestales para definir criterios de sostenibilidad y supervisar los cambios en el uso del suelo, mientras que los cultivos energéticos se limitan a tierras marginales, el sorgo y la caña de azúcar excedentes (excluyendo el maíz) pueden utilizarse para la producción de biocombustibles.

5.3.1.10 Panamá

La Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde y Derivados de Panamá establece objetivos claros para la integración del hidrógeno renovable y el SAF en la combinación energética de la aviación, con el fin de que estas fuentes suministren el 30 % de la demanda energética del sector para 2050²³³. La estrategia establece objetivos generales claves, como convertirse en un *hub* energético sostenible facilitando el uso de hidrógeno renovable (H2V²³⁴) en el transporte aéreo y marítimo, y crear un marco de trabajo jurídico y regulatorio que respalde la inversión y el desarrollo de infraestructuras.

²²⁸ <https://www.iea.org/policies/5290-law-57-07-on-incentives-for-development-of-renewable-energy-sources-and-its-special-regimes>

²²⁹ Toward sustainable decarbonization of aviation in Latin America | MIT News | Massachusetts Institute of Technology.

²³⁰ https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/State_Action_Plans/PLAN-DE-ACCION-DE-REDUCCION-DE-CO2-DEL-ESTADO-ECUATORIANO-2021-2024-signed.pdf

²³¹ <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LBio.pdf>

²³² [https://mexicobusiness.news/aerospace/news/mexico-aims-sustainable-aviation-fuel-2030-says-canaero#:~:text=México%20podría%20comenzar%20a%20producir%20de%20manera%20sostenible,de%20Transporte%20Aéreo%20\(CANAERO\).](https://mexicobusiness.news/aerospace/news/mexico-aims-sustainable-aviation-fuel-2030-says-canaero#:~:text=México%20podría%20comenzar%20a%20producir%20de%20manera%20sostenible,de%20Transporte%20Aéreo%20(CANAERO).)

²³³ Gaceta Oficial Digital.

²³⁴ H2V = Hidrógeno verde (*green hydrogen*).

5.3.1.11 Perú

Perú no ha revelado planes de políticas de SAF. Actualmente, Airbus está trabajando con la OACI para llevar a cabo estudios de viabilidad sobre SAF en Perú, como parte del programa ACT-SAF²³⁵. Se trata de explorar la disponibilidad potencial de materias primas, las necesidades de infraestructura y la viabilidad económica de SAF en el país.

5.3.2 Capacidad de producción anunciada de SAF en LAC

Las materias primas derivadas de la biomasa y los residuos, incluidos los residuos agrícolas y forestales, el aceite de cocina usado y los residuos orgánicos municipales, entre otros, desempeñan un papel relevante en el desarrollo de la producción de SAF a través de rutas de conversión establecidas y emergentes. Aprovechar estos recursos locales podría diversificar la mezcla de combustibles, fortalecer la industria nacional de combustibles y hacer que la implementación de SAF sea una parte integral de la estrategia de seguridad del combustible de aviación de la región. La siguiente tabla muestra las instalaciones de SAF anunciadas en LAC (a octubre de 2025), aunque **es importante señalar que aún no hay ningún proyecto en la región que haya superado la fase de decisión final de inversión (FID)**. Llegar a la FID es una etapa importante para un proyecto, ya que aumenta la probabilidad de que avance hacia la construcción y la producción gracias al compromiso financiero establecido. Hoy en día, todos los proyectos en LAC se encuentran en fase de prefactibilidad y factibilidad, evaluando el potencial, las opciones tecnológicas y la viabilidad comercial de cada propuesta. Sin embargo, es habitual que algunos anuncios de proyectos no pasen de la fase de viabilidad. Esto se ha observado incluso en mercados más desarrollados, como Europa, donde grandes empresas petroleras y gasísticas como Shell y BP han cancelado sus planes de continuar con los proyectos^{236, 237} de SAF anunciados. Por lo tanto, la capacidad anunciada es solo una indicación de la producción potencial, lo cual **no implica que se materializará en producción operativa**.

Tabla39: Instalaciones de SAF en LAC (estado: anuncio y objetivo) a octubre de 2025

País	Productor	SAF (m galones)	Materia prima	Año (estimado) ²³⁸	Estado	Tecnología
Argentina	Grupo Bahia Energia ²³⁹	49,5	Etanol (a partir del maíz)	2031	Anuncio	AtJ
Argentina	GreenSinnergy y Axens ²⁴⁰	*	CO ₂ biogénico	2033	Anuncio	PtL (FT)
Brasil	BP Bunge Bioenergia ²⁴¹	396,3	Etanol (caña de azúcar)	2030	Objetivo	AtJ
Brasil	Brasil BioFuels ²⁴²	66,0	Aceite de palma	2026	Anuncio	HEFA
Brasil	Petrobras ²⁴³	231,2	Aceite de soya y sebo	2029	Anuncio	HEFA
Brasil	Petrobras ²⁴⁴	297,2	Aceite de soya y sebo	2029	Anuncio	HEFA

²³⁵ <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/act-saf.aspx>

²³⁶ <https://www.shell.com/news-and-insights/newsroom/news-and-media-releases/2025/shell-not-restart-construction-rotterdam-biofuels-plant.html>

²³⁷ <https://www.safinvestor.com/news/147414/castellon/>

²³⁸ Si no hay ningún anuncio.

²³⁹ <https://www.safinvestor.com/news/146125/argentina/>

²⁴⁰ <https://www.qcintel.com/biofuels/article/german-firm-partners-with-axens-for-argentina-saf-plant-42839.html>,

<https://www.axens.net/resources-events/news/greensinnergy-and-axens-sign-memorandum-understanding-advance-saf-project-argentina-latin-america/>

²⁴¹ https://www.bp.com/en/global/air-bp/news-and-views/air-bp-news/bp_plans_to_deliver_five_projects_to_increase_SAF_supply.html

²⁴² Biocombustibles: producidos a partir de aceite de palma | Grupo BBF.

²⁴³ Petrobras obtiene la licencia de la tecnología Honeywell UOP para la producción de diésel renovable y SAF en Brasil.

²⁴⁴ <https://www.jota.info/energia/petrobras-anuncia-producao-de-saf-entenda-o-que-e-o-combustivel-sustentavel-de-aviacao>

País	Productor	SAF (m galones)	Materia prima	Año (estimado) ²³⁸	Estado	Tecnología
Brasil	Combustibles ecológicos ²⁴⁵	*	-	2031	Anuncio	AtJ
Brasil	Grupo Energis 8 ²⁴⁶	99,1	Etanol	2031	Anuncio	AtJ
Brasil	Raizen ²⁴⁷	33,0	Etanol (caña de azúcar)	2031	Objetivo	AtJ
Brasil	Acelen ²⁴⁸	132,1	Semillas no comestibles y aceites usados	2027	Anuncio	HEFA
Brasil	Refinería Riograndense ²⁴⁹	99,1	Aceite de soya y sebo	2028	Anuncio	HEFA
Brasil	Satarem América ²⁵⁰	*	Etanol (caña de azúcar)	2028	Anuncio	AtJ
Brasil	Sempen ²⁵¹	*	-	2033	Anuncio	PtL
Chile	Copec e Ineratec ²⁵²	0,8	CO ₂ biogénico	2032	Anuncio	PtL
Colombia	Quipu Bio ²⁵³	*	-	2028	Objetivo	HEFA
Colombia	Bio-D ²⁵⁴	49,5	Desechos agrícolas y forestales	2027	Anuncio	AtJ
Colombia	Ecopetrol ²⁵⁵	*	Aceite de palma, UCO	2028	Anuncio	HEFA
Colombia	Ecopetrol ²⁵⁶	92,5	Aceite de palma, UCO	2030	Anuncio	HEFA
Panamá	SGP BioEnergy: Primera Fase ²⁵⁷	366,5	-	2027	Anuncio	HEFA

* Esta información no ha sido anunciada.

²⁴⁵ <https://greenfuels.co.uk/producing-fuel/>

²⁴⁶ <https://www.cnbrazil.com.br/economia/negocios/empresa-promete-investimento-de-r-2-bi-para-produzir-combustivel-sustentavel-de-aviacao-no-interior-de-sp/>

²⁴⁷ https://finance.yahoo.com/news/ceraweek-brazils-raizen-scouting-locations-175330828.html?guccounter=1&guce_referrer=aHR0cHM6Ly93d3cuZ29vZ2xlLmNvbS8&guce_referrer_sig=AQAAABMF-Dd7LtG258fQjRxuQ0x90NNOEHaHAesaZvv1JCN8mGyhpDwqzP2KAbnJW9oL_IFOgzOPpBikBafiklQXRxfjry0VvNxxYUQCNVuMV762_puRfNaFKDlmZntG5Hu3JyQtD4706Ky68lNxQUM-iqy_uWJn4AMv11Y-dUjUlvT-

²⁴⁸ <https://www.prnewswire.com/news-releases/acelen-renewables-selects-honeywell-for-saf-and-renewable-diesel-fuel-production-302042935.html>

²⁴⁹ <https://www.topsoe.com/press-releases/topsoe-to-provide-technology-for-one-of-brazils-first-commercial-scale-sustainable-aviation-fuel-production-plants>

²⁵⁰ <https://en.clickpetroleogas.com.br/Brazilian-city-will-gain-new-factory-worth-R%2423-billion-and-this-will-generate-800-direct-jobs/>

²⁵¹ <https://www.sempen.com/#OurProjects>

²⁵² <https://www.ineratec.de/en/news/ineratec-and-copec-enter-strategic-partnership-spearhead-e-fuel-availability-chile> ;

<https://www.safinvestor.com/opinion/145423/chile/>

²⁵³ <https://www.linkedin.com/company/quipu-bio/about/>

²⁵⁴ <https://www.aviacionline.com/2023/05/revolutionizing-aviation-in-colombia-latam-airlines-and-bio-d-partner-to-produce-sustainable-fuel/>

²⁵⁵ Ecopetrol concluye las pruebas para la producción de los SAF en la refinería de Cartagena | Oil & Gas Journal.

²⁵⁶ <https://www.safinvestor.com/news/147339/ecopetrol/>

²⁵⁷ <https://www.argusmedia.com/en/news-and-insights/latest-market-news/2496643-sgp-plans-2024-fid-for-panama-biorefinery>,

<https://www.safinvestor.com/project/142197/sgp-bioenergy-golden-city-biorefinery-panama/>

Aunque el número de proyectos es notable, es importante destacar que solo una parte de ellos ha tenido alguna inversión de viabilidad y ninguno ha llegado a la decisión final de inversión. Además, una parte significativa depende de la ruta ATJ, una tecnología que aún se encuentra en fase de desarrollo y no ha alcanzado la madurez. Brasil cuenta con el mayor número de proyectos de producción de SAF anunciados en la región. Junto con la disponibilidad de materia prima en todo el estado y las cadenas de valor de biodiésel y etanol ya existentes, Brasil tiene el potencial de convertirse en un gran *hub* regional de suministro de SAF. Argentina, Chile, Panamá y Colombia también han anunciado instalaciones centradas en las rutas HEFA, AtJ y PtL. La siguiente figura muestra las refinerías de petróleo existentes, los puertos de suministro de combustible de aviación y las instalaciones de SAF anunciadas en la región.

Refinerías, instalaciones de SAF anunciadas y grandes puertos de combustible para aviones en LAC



Fuente: Miskolc Enterprise, S.L., análisis de ICF en 2025.

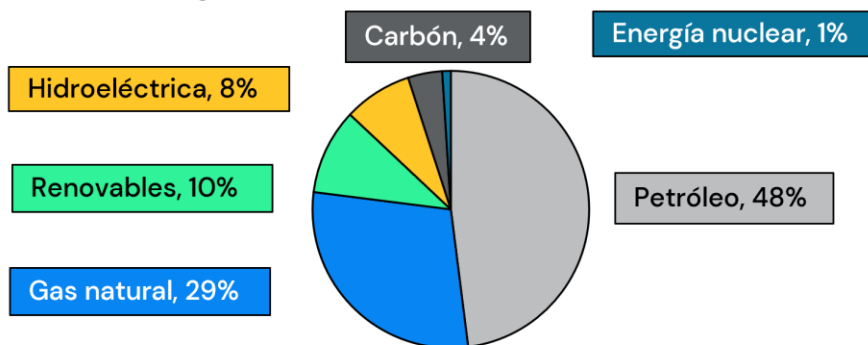
5.4 Infraestructura energética e implicaciones para la producción de SAF

En el contexto de la producción de SAF, es importante analizar el panorama energético general de la región. Los balances energéticos, así como el peso de las energías renovables, son relevantes para las perspectivas de producción potencial de SAF y la posible demanda por parte de otros sectores.

La región se está convirtiendo en uno de los principales líderes a nivel global en el sector de la energía limpia. En 2024, las energías renovables y la energía hidroeléctrica representaban algunas de las principales fuentes de energía, como se muestra en la siguiente figura, lo que resalta la fuerte orientación de la región hacia energías más limpias. Aprovechando sus recursos forestales, así como la producción de maíz y caña de azúcar, la región también se ha convertido en el segundo mayor productor global de biocombustibles²⁵⁸. Este perfil energético muestra el importante potencial de expansión de las fuentes de energía limpia.

Cerca de la mitad del suministro energético en LAC proviene del petróleo, pero la relevancia de las energías renovables y de la hidroeléctrica va en aumento

% del suministro de energía (2024)



Fuente: Energy Institute Statistical Review of World Energy 2025, análisis de ICF.

5.4.1 Retos en el refinado y el suministro de combustible de aviación

La fiabilidad y la adecuación del refinado y el suministro de combustible de aviación son fundamentales para las operaciones futuras de las aerolíneas en LAC. Sin un suministro estable y suficiente de combustible de aviación a un precio competitivo, las aerolíneas se enfrentan a un mayor riesgo de aumento de los costos operativos (que ya representan una parte significativa de los costos operativos totales de las aerolíneas de la región, entre el 30 % y el 40 %) y a dificultades operativas, lo que puede socavar la conectividad y el crecimiento económico en toda la región. A medida que la aviación continúa creciendo, será esencial garantizar una infraestructura de refinería modernizada y una distribución de combustible resiliente no solo para mantener la fiabilidad del servicio, sino también para respaldar la competitividad de la región en el mercado global del transporte aéreo.

En 2024, la capacidad de refinación de la región seguía siendo limitada, contribuía apenas con un 8 % a la capacidad global de refinación de 4.731 Mt al año.

Para los próximos 25 años, la OPEP prevé un modesto aumento de la capacidad de refinación de solo 45,3 Mt en la región²⁵⁹. Dado que se espera que el crecimiento general se mantenga estable, la seguridad del suministro dependerá de las tasas de utilización, de la modernización de las refinerías para cumplir con los estándares de combustibles más limpios y de las señales estables en cuanto a políticas que atraigan la inversión.

Históricamente, gran parte de la industria del crudo se configuró para satisfacer la demanda del mercado estadounidense, dando prioridad a las exportaciones sobre la producción de combustibles refinados para el consumo nacional, incluido el combustible de aviación. La infraestructura de refinería, por ejemplo, la de la región del Caribe, se

²⁵⁸ Energy Institute Statistical Review of World Energy, 2025.

²⁵⁹ <https://publications.opec.org/woo/Download>

diseño en torno a la producción de combustible residual para satisfacer las necesidades de Estados Unidos, en lugar de crear capacidad para los combustibles de transporte dentro de la región²⁶⁰.

Además, la utilización regional general de las refinerías ha disminuido drásticamente, pasando del 84 % en 2000 a solo el 62 % en 2024. Este descenso se debe a un conjunto de retos estructurales y externos. Las sanciones geopolíticas, en particular las impuestas por Estados Unidos a Venezuela sobre el suministro de petróleo, han limitado gravemente uno de los sistemas de refinería más grandes de la región. Al mismo tiempo, la reinversión limitada, el mantenimiento aplazado y el envejecimiento de la infraestructura, incluso en importantes *hubs* de refinado como México, han reducido la eficiencia y la fiabilidad. Además, muchas de las instalaciones están obsoletas tecnológicamente y no son adecuadas para procesar los crudos más pesados que predominan en la producción regional, lo que restringe aún más su utilización, aumenta la dependencia de las importaciones y afecta a la seguridad energética de la región.

Ha habido casos en los que fallos en la infraestructura de las refinerías han interrumpido el suministro de combustible de aviación. En agosto de 2024, un corte de energía en la refinería de Cartagena provocó una escasez de Jet A1 en todo el país. Las reservas de combustible se agotaron en los aeropuertos de Leticia, Montería y Bucaramanga, mientras que los niveles en Bogotá descendieron hasta alcanzar mínimos críticos, lo que afectó a todas las aerolíneas de Colombia. La interrupción provocó un déficit del 5 % en las entregas de Jet A1 y requirió importaciones de emergencia de 12 700 toneladas. Esto destacó la importancia de garantizar un suministro confiable de combustible de aviación en la región. Como resultado, la disminución de los activos de refinería ha socavado la capacidad de la región para satisfacer la demanda de combustible de aviación, lo que ha reforzado la dependencia de las importaciones a pesar de la considerable capacidad instalada. Esto se demuestra en la siguiente figura. Informes recientes han destacado dificultades significativas en la gestión del suministro de combustible de aviación en varios países de la región. Estas disrupciones en el suministro han provocado un aumento de la incertidumbre y la inestabilidad en el sector de la aviación, con consecuencias directas como retrasos en los vuelos. Estas cuestiones subrayan la urgente necesidad de mejorar la coordinación y la supervisión de los procesos de distribución de combustible para mitigar los riesgos operativos y garantizar la fiabilidad de los servicios de transporte aéreo^{261, 262, 263}.

²⁶⁰ <https://digitalcommons.law.umaryland.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1103&context=mjil>

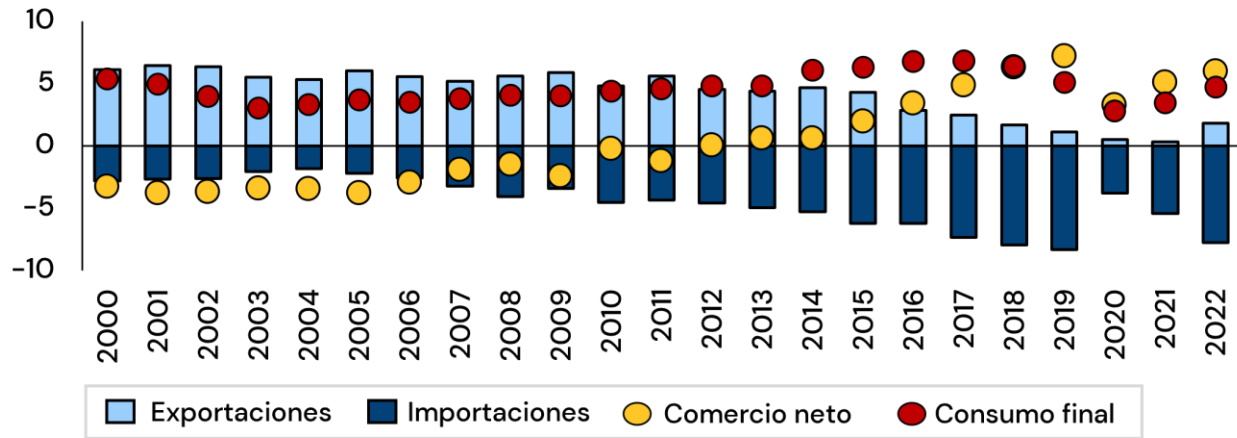
²⁶¹ https://rpp.pe/lima/actualidad/pasajeros-de-vuelo-a-arequipa-se-encuentran-varados-en-avion-por-falta-de-combustible-en-nuevo-aeropuerto-jorge-chavez-noticia-1638386?ref=rpp#google_vignette

²⁶² <https://www.infobae.com/peru/2025/06/03/mtc-senala-a-lap-como-responsable-del-desabastecimiento-de-combustible-en-el-nuevo-aeropuerto-jorge-chavez/>

²⁶³ <https://rpp.pe/lima/actualidad/lap-reconoce-que-no-hay-correcta-distribucion-de-combustible-en-nuevo-aeropuerto-tras-reportes-de-vuelos-varados-noticia-1638394?ref=rpp>

LAC se ha convertido en un importador de combustible de aviación en la última década

Comercio de combustible de aviación en LAC (Mt)

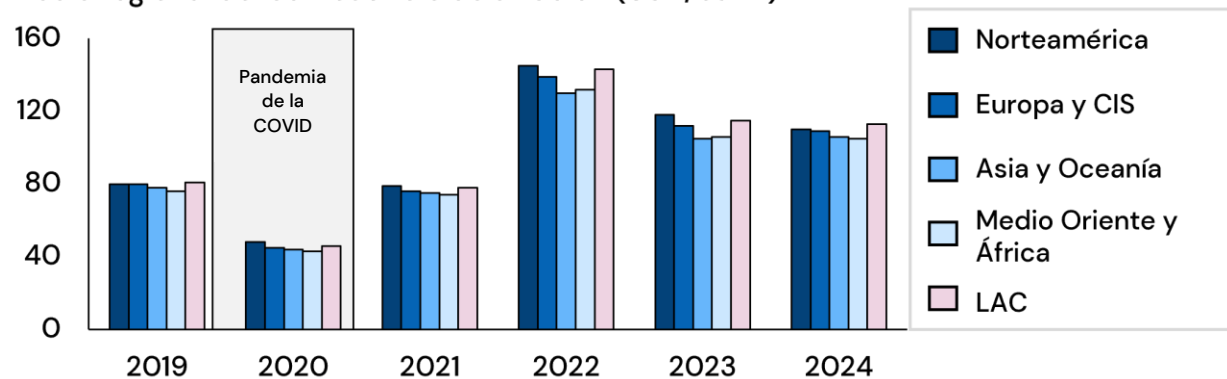


Fuente: estadísticas de la ONU, análisis de ICF.

En 2024, LAC registró los precios más altos del mundo por barril de combustible de aviación; también ha sido sistemáticamente la región con los precios más altos o los segundos más altos desde 2019, como se muestra en la siguiente gráfica. Esto está impulsado por la gran dependencia de la región de las importaciones, a la capacidad de refinado limitada y desigual, y a una cadena de suministro fragmentada, retos que se ven agravados por la depreciación de la moneda y los elevados costos logísticos.

Históricamente, el precio del combustible de aviación en LAC se ha ubicado en el extremo superior comparado con otras regiones

Precio regional del combustible de aviación (USD/barril)



Fuente: S&P Global Energy, ©2025 by S&P Global Inc. Platts World Jet Fuel Indexes. Análisis de ICF.

5.5 La sostenibilidad y el mercado global de SAF

A menudo se dice que LAC tiene un gran potencial para producir combustibles de aviación sostenibles, gracias a sus grandes extensiones de tierras agrícolas y la disponibilidad de materia prima que esto implica. Sin embargo, la evaluación de este potencial debe sopesarse cuidadosamente con los riesgos asociados, entre ellos la competencia con la producción de alimentos, el cambio en el uso del suelo y las presiones sobre los ecosistemas locales, prestando especial atención a la biodiversidad, la disponibilidad de agua y el impacto social a gran escala. Para hacer frente a estos

riesgos, es esencial que la política sobre combustibles renovables incluya criterios de sostenibilidad sólidos, los cuales garanticen que el uso de estos combustibles deje beneficios medioambientales y sociales reales a cada país y a su población en su conjunto.

Es necesario realizar más evaluaciones para comprender plenamente los efectos ambientales, sociales y económicos más amplios de la producción de SAF en LAC. La recopilación exhaustiva e independiente de datos y el análisis científico a nivel de cuenca de captación, paisaje y región son fundamentales para identificar posibles compensaciones y consecuencias no deseadas. Los incentivos gubernamentales o el apoyo focalizado podrían desempeñar un papel fundamental para acelerar el desarrollo de esta sólida base empírica, fomentar la colaboración entre los grupos de interés y garantizar la transparencia. Estas iniciativas no solo proporcionarían información fundamental para la toma de decisiones a los responsables de las políticas, sino que también facilitarían la alineación con los estándares internacionales de sostenibilidad, lo que en última instancia reforzaría la posición de la región en el mercado global de combustibles sostenibles para la aviación.

5.5.1 La sostenibilidad en el contexto de LAC

Varios países de LAC están comenzando a explorar marcos de trabajo de sostenibilidad de SAF, a menudo basándose en directrices internacionales como CORSIA y los principios de la CMNUCC. En particular, el principio de responsabilidades comunes pero diferenciadas de la CMNUCC es importante en la región debido a su amplia diversidad socioeconómica, ya que es un marco de trabajo para equilibrar el desempeño ambiental con las realidades del desarrollo local. Estas iniciativas se encuentran aún en fase inicial, lo que muestra tanto el estado incipiente de la implementación de SAF en la región como la necesidad de integrar consideraciones de desarrollo más amplias en los marcos de trabajo de sostenibilidad.

Al mismo tiempo, los datos necesarios para respaldar plenamente la certificación CORSIA y otras evaluaciones internacionales de sostenibilidad aún se están desarrollando en LAC. Gran parte de la información disponible en la actualidad proviene de estudios sobre unidades de producción, que, aunque proporcionan datos útiles, pueden no mostrar los impactos sistémicos más amplios a nivel de cuenca de captación, paisaje o región. El fortalecimiento de los datos científicos independientes a estas escalas proporcionaría a los responsables de las políticas una mayor confianza a la hora de abordar posibles compensaciones y evitar consecuencias no deseadas. Esto también supone una oportunidad para que la región construya una base empírica sólida que respalde tanto las prioridades nacionales como la alineación internacional.

Los mercados actuales de biocombustibles en LAC están dominados por materias primas derivadas de cultivos primarios, como la caña de azúcar, la soya y la palma. Aunque bien establecidas, generan preocupaciones recurrentes respecto al cambio en el uso del suelo, la biodiversidad y la seguridad alimentaria, lo que podría influir en su papel como materias primas para los combustibles sostenibles de aviación. Al mismo tiempo, existe un creciente interés por los desechos, residuos y subproductos, como el bagazo, los residuos forestales, el aceite de cocina usado y los residuos sólidos urbanos. Estos materiales suelen generar menos presión sobre el uso del suelo, pero requieren de la contabilización y la trazabilidad de las emisiones durante su ciclo de vida. Los programas de certificación voluntaria, como Bonsucro, ISCC y RSB, tienen un papel complementario (junto con el CORSIA), puesto que proporcionan los estándares de sostenibilidad específicos para cada materia prima que ayudan a definir cómo se evalúan las diferentes opciones de SAF en la región.

Hasta la fecha, la mayoría de los esfuerzos regulatorios en materia de combustibles renovables en América Latina se han centrado en los mercados nacionales de biocombustibles, más que en el comercio internacional. Varios países podrían aprovechar los programas de biocombustibles existentes para apoyar la sostenibilidad de SAF.

La armonización de los criterios de sostenibilidad es un factor importante para facilitar el comercio internacional de SAF. Esto aplica tanto al comercio dentro de LAC como a nivel global, donde pueden exigirse criterios de sostenibilidad más estrictos. Gracias a la inversión continua en datos, análisis científicos y monitoreo independiente, la región tiene una gran oportunidad para crear una industria de combustibles sostenibles para la aviación que satisfaga tanto las prioridades de desarrollo locales como las necesidades del transporte aéreo global.

Si bien LAC está dando los primeros pasos hacia la sostenibilidad de SAF, muchos marcos de trabajo se encuentran aún en etapas iniciales de desarrollo. La diversidad socioeconómica de la región subraya la relevancia de las directrices de la CMNUCC a la hora de elaborar políticas de sostenibilidad equitativas y sensibles al contexto. Alinear con los criterios internacionales de sostenibilidad puede mejorar el acceso al mercado, especialmente en el contexto de *book and claim*;

sin embargo, el grado de importancia puede variar en función de las prioridades estratégicas y la etapa de desarrollo de cada país.

5.5.2 Estándares globales de sostenibilidad de SAF

En todo el mundo, diferentes jurisdicciones han establecido sus propios marcos de trabajo para regular el desempeño ambiental y social de SAF. Por lo tanto, la alineación de los criterios entre dichos marcos de trabajo es fundamental para garantizar que los SAF puedan circular libremente por los mercados, manteniendo al mismo tiempo su credibilidad en términos de resultados climáticos y de sostenibilidad. En el contexto de SAF, la Unión Europea, el Reino Unido y Estados Unidos son los más avanzados en el progreso hacia la aplicación de criterios de sostenibilidad, mientras que otras regiones aún están desarrollando marcos de trabajo nacionales o se basan principalmente en los estándares internacionales como CORSIA.

5.5.2.1 Unión Europea

En la UE, los criterios de sostenibilidad de SAF están definidos por ReFuelEU²⁶⁴ Aviation y la Directiva sobre energías renovables III (RED III). Estos marcos de trabajo especifican umbrales mínimos de ahorro de GEI durante el ciclo de vida en comparación con el combustible fósil para aviones (94 gCO_{2e}/MJ) del 65 %²⁶⁵ para los biocombustibles y de al menos el 70 % para los combustibles de carbono reciclado y los combustibles renovables de origen no biológico. El SAF producido a partir de cultivos no es elegible como parte del programa ReFuelEU Aviation. RED III también contiene disposiciones medioambientales relativas a la biodiversidad, el cambio en el uso del suelo y la salud del suelo, pero no incluye directrices sobre los aspectos sociales o económicos de la sostenibilidad.

5.5.2.2 Reino Unido

En el Reino Unido, los criterios de sostenibilidad de SAF se definen en el Mandato SAF, que forma parte de la Obligación de Combustibles Renovables para el Transporte. Los combustibles elegibles deben lograr una reducción mínima del 40 % en las emisiones de gases de efecto invernadero durante su ciclo de vida en comparación con el combustible fósil para aviones (~89 gCO_{2e}/MJ). Solo son elegibles los residuos y desechos, los combustibles de carbono reciclados y los combustibles líquidos producidos a partir de hidrógeno con bajas emisiones de carbono y electricidad renovable. Se excluyen los biocombustibles derivados de cultivos (incluidos los producidos a partir de cultivos energéticos específicos).

El Mandato incluye disposiciones medioambientales para la biomasa forestal, las cuales exigen la legalidad de la cosecha (tala), la gestión forestal sostenible y la trazabilidad de las materias primas. Al igual que el marco de trabajo de la UE, el Mandato SAF del Reino Unido se centra en el desempeño medioambiental y no ofrece orientación detallada sobre aspectos de sostenibilidad social o económica.

5.5.2.3 Estados Unidos

En Estados Unidos, los criterios de sostenibilidad de SAF se definen principalmente a través de la Ley OBBBA (One Big Beautiful Bill Act), que prorroga el crédito para la producción de combustibles limpios 45Z hasta 2029. Los combustibles elegibles deben tener unas emisiones de gases de efecto invernadero inferiores a 47,4 gCO_{2e}/MJ durante su ciclo de vida.

Sin embargo, a partir de 2026, solo las materias primas procedentes de Estados Unidos, Canadá o México podrán optar a este crédito²⁶⁶, lo que excluye de facto las importaciones de América Latina. Si bien la OBBBA también elimina el ILUC de los cálculos de emisiones, esto tiene implicaciones directas limitadas para el mercado latinoamericano (excepto México), dada la restricción del crédito a las materias primas y la producción norteamericanas.

5.5.2.4 Resumen

Al igual que CORSIA, los marcos de trabajo de sostenibilidad de SAF en la UE, el Reino Unido y Estados Unidos incluyen criterios claros de reducción de GEI, aunque los umbrales específicos y las materias primas elegibles varían según la región. CORSIA establece una línea base global más baja, con una reducción del 10 % de los GEI, lo que significa que el

²⁶⁴ Cabe señalar que el análisis de la IATA sugiere que, en virtud del mandato ReFuelEU, las tasas por SAF pagadas por las aerolíneas han sido más del doble de los precios de mercado de SAF, ya que los proveedores de combustible, como partes obligadas (proveedores de combustible), han optado por repercutir las sanciones por incumplimiento: <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/excessive-saf-fees-in-the-eu--a-lost-opportunity-to-abate-2.7-million-tonnes-of-co2>

²⁶⁵ En virtud de RED II, los biocombustibles para transporte deben lograr un ahorro del 50 % en las instalaciones operativas antes de octubre de 2015, del 60 % en las instalaciones posteriores a octubre de 2015 y del 65 % en las nuevas instalaciones a partir de 2021.

²⁶⁶ <https://rsmus.com/insights/services/business-tax/obbba-tax-clean-fuels.html#:~:text=Exclusión%20de%20materias%20primas%20extranjeras:%20Eficaz,productores>

cumplimiento de CORSIA respecto a los SAF por sí solo puede no satisfacer automáticamente los requisitos más estrictos de estos mercados regionales. Por ejemplo, en la UE, los cultivos destinados a la alimentación humana y animal no se consideran materias primas admisibles, mientras que en Estados Unidos y en CORSIA pueden utilizarse, siempre y cuando cumplan los criterios de sostenibilidad exigidos. Al mismo tiempo, CORSIA adopta un enfoque más holístico, abordando temas de sostenibilidad ambiental, social y económica, mientras que los marcos de trabajo de la UE, el Reino Unido y Estados Unidos se centran en el desempeño ambiental. Las diferencias en los estándares de sostenibilidad pueden afectar al acceso al mercado para SAF, ya que los productores deben ajustarse a los requisitos específicos de cada jurisdicción.

5.6 Disponibilidad de materias primas biogénicas para la producción de SAF

En esta sección se describe el enfoque utilizado para seleccionar las materias primas analizadas en este estudio y la metodología empleada para cuantificar su disponibilidad para el SAF. La información se presenta por materia prima para hacer posible una descripción más eficiente de la metodología. Los resultados se resumen a nivel de país en la sección 5.6.5.

5.6.1 Selección de materias primas

Las materias primas consideradas se resumen en la siguiente tabla y se seleccionaron en función de:

1. Reconocimiento de CORSIA solo se tuvieron en cuenta las materias primas reconocidas actualmente por CORSIA²⁶⁷.
2. Compatibilidad con al menos uno de los procesos de conversión SAF aprobados por la ASTM²⁶⁸.
3. Relevancia comercial demostrada en América Latina: solo se incluyeron materias primas con cadenas de suministro establecidas o emergentes en la región, con el fin de garantizar la viabilidad a corto y mediano plazo de la producción de SAF.

Tabla40: Resumen de las materias primas consideradas para la producción de SAF en este estudio

Materia prima	Clasificación de la OACI	Procesos de conversión compatibles
Aceite de palma	Producto primario	HEFA, coprocesamiento
Aceite de soya	Producto primario	HEFA, coprocesamiento
Caña de azúcar (como etanol)	Producto primario	AtJ
Maíz (como etanol)	Producto primario	AtJ
Grasas animales	Subproducto	HEFA, coprocesamiento
Desechos agrícolas	Desechos	FT, AtJ (como etanol lignocelulósico)
Desechos forestales	Desechos	FT
Aceite de cocina usado	Desechos	HEFA, coprocesamiento
Desechos sólidos urbanos	Desechos	FT
Gases de desechos (como etanol)	Desechos	AtJ

5.6.2 Metodología general

La metodología general seguida para evaluar la disponibilidad de materias primas para SAF se ilustra en la siguiente gráfica. El primer paso es evaluar el potencial teórico de la materia prima, definido como la cantidad máxima de materia prima disponible. El segundo paso consiste en estimar el potencial técnico, el cual representa la fracción del potencial teórico que realmente se puede recolectar, teniendo en cuenta las limitaciones técnicas y logísticas. A continuación, se

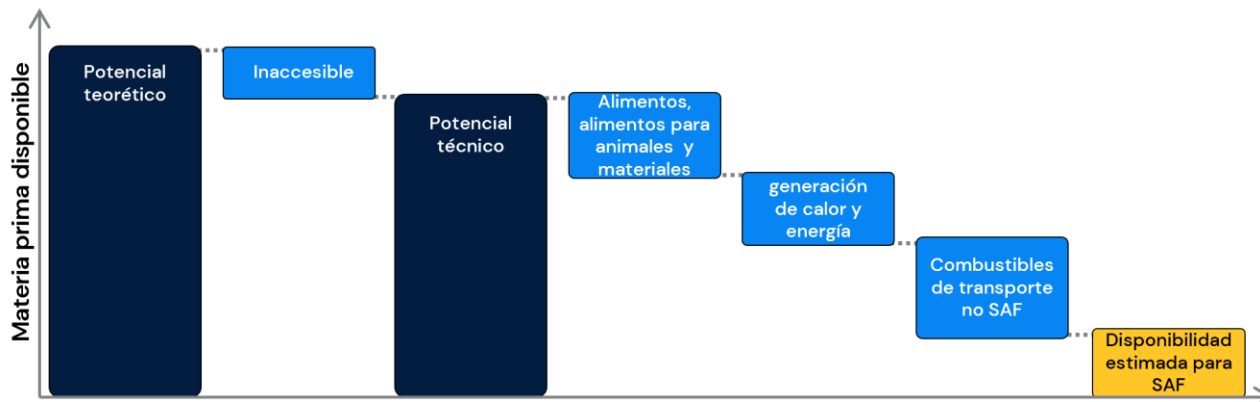
²⁶⁷ Materias primas SAF de la OACI

²⁶⁸ OACI: procesos de conversión aprobados.

tuvieron en cuenta los usos competitivos existentes de la materia prima, incluidos sus aplicaciones en alimentos para humanos, alimentos para animales, materiales, generación de calor y energía, y combustibles de transporte no SAF (por ejemplo, transporte por carretera). La cantidad restante tras estas deducciones se considera la materia prima disponible para la producción de SAF.

En las siguientes secciones se evalúa el potencial teórico y la disponibilidad de SAF para cada una de las materias primas identificadas en la tabla anterior²⁶⁹.

Se sigue un enfoque de tres pasos para obtener la materia prima disponible en LAC para producir los SAF



Fuente: análisis de ICF.

5.6.3 Análisis en profundidad de las materias primas

5.6.3.1 Aceite de cocina usado

El aceite de cocina usado (UCO) es una materia prima a base de aceite adecuada para la producción de SAF mediante el proceso HEFA y el coprocesamiento. Para evaluar el potencial de SAF a partir del UCO, el análisis partió de los datos de población²⁷⁰ de cada país dentro del alcance del estudio. Posteriormente, se analizó el consumo de aceite vegetal, así como la tasa de recolección, para estimar los volúmenes recuperables de aceite usado de cocina. Esta metodología sigue el enfoque desarrollado por Teixeira et al.,²⁷¹ según el cual se generan 320 g de UCO por cada kg de aceite vegetal consumido, y posteriormente se valorizan 232 g por cada kg de UCO.

A partir del UCO recolectado, se llevó a cabo un análisis para estimar la disponibilidad de SAF, excluyendo los volúmenes asignados a otros sectores del transporte. Es importante destacar que se restaron 0,1 Mt, ya que esta cantidad se asigna a la producción de biodiésel (FAME)²⁷². La disponibilidad resultante de SAF se presenta en la siguiente tabla.

²⁶⁹ Volúmenes de materia prima cuantificados como energía utilizando las siguientes conversiones (GJ/t): UCO, grasas animales y aceites vegetales: 37; Etanol: 27; Residuos agrícolas y forestales: 18; RSU: 12.

²⁷⁰ <https://population.un.org/wpp/>

²⁷¹ Teixeira, M. R., Nogueira, R., & Nunes, L. M. (2018). *Quantitative assessment of the valorisation of used cooking oils in 23 countries. Waste management*, 78, 611-620.

²⁷² https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels%20Annual_Brasilia_Brazil_BR2024-0022.pdf

Tabla 41: Disponibilidad teórica del UCO y disponibilidad estimada para la producción de SAF con base en las estimaciones para 2025²⁷³.

País	Potencial teórico en 2025 (PJ)	Disponibilidad estimada para SAF en 2025 (PJ)
Argentina	8,37	1,66
Bahamas	0,02	-
Brasil	45,67	5,39
Chile	1,22	0,24
Colombia	7,99	1,59
República Dominicana	2,42	0,48
Ecuador	3,52	0,70
El Salvador	0,20	0,02
México	16,30	3,23
Panamá	0,38	0,08
Perú	2,78	0,55
Total	88,87	13,94

Los resultados revelan que Brasil, Argentina y México presentan la mayor disponibilidad de SAF derivado de materia prima del UCO, mientras que la disponibilidad de SAF en Bahamas, El Salvador y Panamá es insignificante (menos de 1 PJ).

Perspectivas

Hoy en día, la recolección del UCO está experimentando una fase de crecimiento en muchos países latinoamericanos, impulsada por las regulaciones medioambientales, las campañas de concienciación pública y la creciente viabilidad del UCO como materia prima para biocombustibles. Teniendo en cuenta el crecimiento demográfico, la expansión de las redes de recolección y el aumento de la participación de los consumidores, se espera que la disponibilidad teórica del UCO continúe su tendencia al alza, lo que la convierte en una fuente potencial de SAF.

5.6.3.2 Grasas animales

Las grasas animales incluyen el sebo de vacuno, la manteca de cerdo y la grasa de pollo, que son subproductos del procesamiento industrial. Las grasas comestibles se utilizan en la producción de alimentos, mientras que las grasas no comestibles ofrecen oportunidades para aplicaciones tales como alimentos para mascotas, alimentos para animales, generación de energía y fabricación de jabón. Esta materia prima es atractiva porque tiene un costo más bajo en comparación con los aceites vegetales, pero plantea problemas de sostenibilidad y restricciones regulatorias en varios países²⁷⁴. Como se muestra en la siguiente tabla, esta materia prima puede convertirse en SAF utilizando el proceso HEFA y rutas de coprocesamiento. Para evaluar la disponibilidad de SAF derivado de grasas animales, se analizó la producción de sebo en cada país. Para lograrlo, se extrajeron los datos sobre la producción de sebo y el valor del ganado de la FAO^{275, 276}.

²⁷³ Análisis de ICF.

²⁷⁴ Blanshard, A., McCurdy, M., & Chokhani, S. (2021). *Fueling Net Zero How the aviation industry can deploy sufficient sustainable aviation fuel to meet climate ambitions An ICF Report for ATAG Waypoint 2050*.

²⁷⁵ <https://www.fao.org/faostat/en/#home>

²⁷⁶ <https://www.fao.org/global-perspectives-studies/food-agriculture-projections-to-2050/en/>

Tabla42: Disponibilidad teórica y disponibilidad estimada de grasas animales para la producción de SAF con base en las estimaciones para 2025²⁷⁷

País	Potencial teórico en 2025 (PJ)	Disponibilidad estimada para SAF en 2025 (PJ)
Argentina	10,34	1,34
Bahamas	-	-
Brasil	44,86	5,12
Chile	0,74	0,09
Colombia	7,86	1,02
República Dominicana	-	-
Ecuador	-	-
El Salvador	0,22	0,03
México	7,84	1,01
Panamá	-	-
Perú	1,57	0,20
Total	73,43	8,81

Brasil representa aproximadamente el 72 % de la producción de sebo entre los países incluidos en este estudio, seguido de Argentina (15 %). Basándose en este análisis, el sebo se ha utilizado en diversas aplicaciones, como formulaciones de alimento para cerdos, aves de corral y mascotas, así como en las industrias química, higiénica y de limpieza, en la producción de barnices, lubricantes y glicerina para uso farmacéutico. En Brasil, el principal uso del sebo es la producción de biodiésel, debido a su rentabilidad y sostenibilidad como fuente de grasa²⁷⁸.

En la práctica, aproximadamente el 30 % del procesamiento de subproductos animales en Brasil se destina a la producción de biodiésel, el 27 % a productos de cuidado personal, el 30 % a alimentos para mascotas²⁷⁹ y el 13 % restante a exportaciones. En términos de exportaciones, Estados Unidos representó aproximadamente el 97 % de las exportaciones de sebo de Brasil en 2025²⁸⁰. Además, se excluyeron 0.64 Mt de sebo de Brasil, ya que se asignan a la producción de biodiésel (FAME)²⁸¹. Por consiguiente, el potencial para producir SAF a partir de grasas animales en la región depende principalmente de la reorientación de los volúmenes de exportación hacia la producción nacional. El análisis de la disponibilidad de SAF a partir de grasas animales se realizó utilizando la misma metodología aplicada a Brasil, lo que dio como resultado un potencial estimado de 5,12 PJ para Brasil, seguido de 1,34 PJ para Argentina y 1,01 PJ para México.

Perspectivas

La grasa animal es un coproducto de la industria cárnica. Si bien la industria cárnica en América Latina es importante, su crecimiento suele ser constante y está vinculado al crecimiento demográfico y económico. El volumen de grasa animal generado es relativamente coherente con la escala de producción y procesamiento ganadero. Aunque existe un creciente interés en su uso para biocombustibles, no se espera que la oferta global experimente aumentos drásticos más allá del crecimiento constante de la industria primaria.

²⁷⁷ Análisis de ICF.

²⁷⁸ <https://brazilianrenderers.com/fats/>

²⁷⁹ <https://nara.org/wp-content/uploads/2024/10/Lucas-Cypriano-Brazil-update.pdf>

²⁸⁰ <https://www.fastmarkets.com/insights/us-saf-exporters-become-key-outlet-for-brazilian-tallow-in-august/>

²⁸¹ https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels%20Annual_Brasilia_Brazil_BR2024-0022.pdf

5.6.3.3 Aceite de palma

El aceite de palma es un aceite vegetal producido a gran escala en América Latina, proviene del fruto de las palmas de aceite. En el contexto de la producción de los SAF, puede utilizarse como materia prima para producir SAF basado en el proceso HEFA o como insumo para rutas de coprocesamiento.

Como se muestra en la siguiente tabla, Colombia es el mayor productor de aceite de palma de LAC, con una producción que llegó a los 65 PJ (1,77 Mt) en 2022. Otros productores importantes son Brasil, Ecuador, México y Perú, con una producción anual en toda la región, incluida Colombia, que asciende a un total de 131 PJ (3,5 Mt).

El aceite de palma se utiliza masivamente en la producción de alimentos y otros productos industriales, como jabones y detergentes. Estos usos tienen prioridad sobre la producción de biocombustibles según la jerarquía de residuos. Por lo tanto, en este análisis se consideró que el aceite de palma que se utiliza actualmente para estos fines (incluidas las exportaciones), no estaba disponible para la producción de SAF.

Tabla43: Disponibilidad teórica y estimada de aceite de palma para la producción de SAF con base en las estimaciones para 2025²⁸²

País	Potencial teórico en 2025 (PJ)	Disponibilidad estimada para SAF en 2025 (PJ)
Argentina	-	-
Bahamas	-	-
Brasil	21,70	0,0035
Chile	-	-
Colombia	65,40	-
República Dominicana	1,70	-
Ecuador	16,20	-
El Salvador	-	-
México	13,20	-
Panamá	2,20	-
Perú	10,40	-
Total	130,80	0,0035

El aceite de palma también se ha consolidado en LAC como materia prima para la producción de biodiésel (es decir, éster metílico de ácidos grasos, FAME), que puede consumirse a nivel nacional o exportarse. Para efectos del presente análisis, se asume que el volumen de aceite de palma que se consume actualmente en el mercado interno como biodiésel no está disponible para la producción de SAF, con el fin de evitar desplazar el uso actual de energías renovables.

Por el contrario, se asume que el aceite de palma que actualmente se exporta como biodiésel podría redirigirse y quedarse en el país para la producción de SAF. Según datos del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), solo Brasil²⁸³ fue identificado como exportador de biodiésel basado en palma²⁸⁴.

Aunque Colombia es el mayor productor de aceite de palma de LAC, y cuenta con una industria nacional de biodiésel desarrollada, toda la producción nacional se consume dentro de Colombia²⁸⁵. Del mismo modo, la producción nacional de biodiésel en Perú se utiliza íntegramente en el mercado interno²⁸⁶. La producción de biodiésel en los demás países productores de palma es limitada²⁸⁷.

²⁸² Análisis de ICF.

²⁸³ USDA – Brazil Biofuels Annual 2024.

²⁸⁴ Esto supone que la composición de la materia prima de las exportaciones brasileñas de biodiésel refleja las proporciones utilizadas en la producción nacional.

²⁸⁵ USDA – Colombia Biofuels Annual 2025.

²⁸⁶ USDA – Peru Biofuels Annual 2025.

²⁸⁷ Technical Note No.5 An introduction to the biofuels sector in Latin America and the Caribbean.

En la actualidad, según los supuestos descritos anteriormente, ninguno de los países evaluados cuenta con un suministro de aceite de palma que pueda destinarse a la producción de combustibles de aviación sostenibles. Se constató que el volumen de biodiésel derivado del aceite de palma exportado desde Brasil era insignificante (0,0035 PJ, ~0,09 kilotoneladas). En los demás países productores de aceite de palma, la producción actual se destina íntegramente al consumo interno o a exportaciones ya comprometidas con otros mercados de mayor prioridad (es decir, alimentos para humanos / animales), por lo que no está disponible para la producción de SAF.

Perspectivas

El análisis descrito anteriormente destaca que, con base en los niveles actuales de producción, es probable que haya pocas oportunidades para utilizar el aceite de palma como materia prima para la producción de SAF en LAC, ya que el suministro existente se destina a otros usos en mercados consolidados. Esto indica que se necesitaría un mayor suministro de aceite de palma para hacer posible su uso en la producción de SAF. Esto se lograría, por ejemplo, mediante la mejora de las prácticas agrícolas que permitan aumentar el rendimiento de las plantaciones existentes. Sin embargo, es esencial que el uso del aceite de palma como materia prima para SAF no desvíe la materia prima de los mercados existentes, en particular el alimentario, ni induzca a cambios en el uso del suelo para la producción de palma.

La sostenibilidad es un factor crítico para tener en cuenta en el uso del aceite de palma como materia prima para SAF. En el marco de trabajo actual del CORSIA, solo se especifica un valor ILUC para el aceite de palma producido en Indonesia y Malasia. Como resultado, el aceite de palma producido en LAC no se considera una materia prima elegible como parte del CORSIA. Además, es poco probable que el aceite de palma procesado sin capturar el metano de los efluentes de las plantas de aceite de palma (POME) cumpla con los requisitos de sostenibilidad de CORSIA. En Colombia, por ejemplo, menos del 12 % de las plantas de procesamiento cuentan con sistemas de captura de metano hoy en día²⁸⁸. Además, garantías sobre el posible impacto sistemático que podría tener cualquier expansión de la producción de aceite de palma hacia territorios actualmente sin plantar en el agua y la biodiversidad, y, en particular, que se eviten los humedales, las turberas o la sabana.

5.6.3.4 Aceite de soya

El aceite de soya es un aceite vegetal muy producido en América Latina. Este derivado de las semillas de la soya puede utilizarse como materia prima para producir SAF basado en el proceso HEFA o como insumo para rutas de coprocesamiento.

Como se muestra en la siguiente tabla, la producción de aceite de soya en LAC se concentra principalmente en Brasil y Argentina, que producen alrededor de 323 PJ (8,7 Mt) y 276 PJ (7,5 Mt) al año, respectivamente. El volumen de producción de aceite depende tanto de la escala de producción de soya como de la capacidad de trituration nacional²⁸⁹.

Por ejemplo, en Argentina, la capacidad de trituration supera la producción nacional de soya, lo que obliga a importar semillas para aprovechar al máximo las instalaciones. Por el contrario, en Brasil, la capacidad de trituration es solo aproximadamente la mitad de la cosecha anual de soya, lo que significa que una parte significativa de semillas de soya se exporta en lugar de procesarse para obtener aceite en el país.

Este análisis consideró que la soya que no se tritura en el país no está disponible para la producción de SAF, ya que las exportaciones de semillas de soya de América Latina se destinan principalmente a los mercados de alimentos para humanos y para animales²⁹⁰. La soya que se comercializa dentro de la región y posteriormente se tritura se refleja en las cifras de producción de aceite de soya del país donde se realiza la trituration, evitando así la doble contabilización.

El aceite de soya se utiliza a gran escala en América Latina como materia prima para la producción de biodiésel. De acuerdo con la metodología aplicada al aceite de palma (véase la sección 5.6.3.3), se asumió que solo el volumen de aceite de soya que actualmente se exporta como biodiésel podía considerarse disponible para la producción de SAF.

²⁸⁸ <https://elpalmicultor.com/biogas-impulso-economia-descarbonizacion-sector/>

²⁸⁹ <https://www.spglobal.com/commodity-insights/en/news-research/latest-news/agriculture/022725-brazilian-soybean-meal-pulls-ahead-as-argentina-faces-supply-challenges>

²⁹⁰ <https://www.reuters.com/markets/commodities/chinas-reliance-soybean-imports-continues-despite-cutback-plans-braun-2025-04-30/>

Tabla44: Disponibilidad teórica y disponibilidad estimada de aceite de soya para la producción de SAF con base en las estimaciones para 2025 ²⁹¹

País	Potencial teórico en 2025 (PJ)	Disponibilidad estimada para SAF en 2025 (PJ)
Argentina	276,00	31,30
Bahamas	-	-
Brasil	323,00	-
Chile	0,38	-
Colombia	6,80	-
República Dominicana	0,21	-
Ecuador	0,18	-
El Salvador	-	-
México	36,80	-
Panamá	0,26	-
Perú	0,05	-
Total	643,68	31,30

Este análisis mostró que Argentina exporta 31 PJ (0,85 Mt) de aceite de soya como biodiésel, lo que equivale a alrededor del 50 % de la producción nacional²⁹², la cual podría considerarse disponible para SAF. Las cantidades disponibles en Brasil son mucho menores, ya que el biodiésel producido en el país se consume casi en su totalidad a nivel nacional²⁹³.

Perspectivas

Es probable que LAC tenga un potencial limitado para aumentar la producción de aceite de soya para su uso como materia prima para SAF. Esto debido a las preocupaciones en torno al cambio en el uso del suelo, el agua y el impacto en la naturaleza a gran escala. Los pronósticos de la OCDE y la FAO sugieren que la producción global de soya seguirá creciendo alrededor de un 1,3 % anual hasta 2029²⁹⁴, impulsada por el aumento del rendimiento (66 % del crecimiento de la producción) y el aumento de la superficie cosechada (33 % del crecimiento de la producción). Sin embargo, este crecimiento se debe en gran medida al aumento de la demanda de alimento para ganado²⁹⁵. Por lo tanto, cualquier nueva demanda de aceite de soya para SAF muy probablemente se añadiría a esta demanda existente y creciente de alimentos para animales. Esto genera una presión inherente para una mayor expansión territorial, incluso teniendo en cuenta las ganancias en productividad.

Históricamente, la producción de soya en LAC ha sido un generador de deforestación. Si bien los esfuerzos por eliminar la deforestación directa en la región han tenido cierto éxito²⁹⁵ recientemente se ha demostrado que la expansión de las plantaciones de soya está generando deforestación indirecta en Brasil y Argentina²⁹⁵.

Además, en Brasil, la oferta interna de soya supera la capacidad de trituration, por lo que habría que aumentar dicha capacidad antes de que se pueda producir aceite de soya como materia prima para biocombustibles sostenibles en el país²⁸⁹.

5.6.3.5 Bioetanol a partir de caña de azúcar y maíz

El bioetanol es una materia prima clave para la producción de SAF mediante el proceso de conversión de alcohol a combustible de aviación (AtJ). Se produce normalmente mediante la fermentación de cultivos ricos en azúcar o almidón, sobre todo caña de azúcar y maíz en América Latina. Aunque su uso principal sigue siendo como combustible para el transporte por carretera, el bioetanol también se emplea en las industrias farmacéutica, alimentaria, química, de bioplásticos y de desinfectantes²⁹⁵.

²⁹¹ Análisis de ICF.

²⁹² USDA – Argentina Biofuels Annual 2024.

²⁹³ USDA – Brazil Biofuels Annual 2024.

²⁹⁴ https://www.transportenvironment.org/uploads/files/2020_11_Study_Cerulogy_soy_and_deforestation.pdf

²⁹⁵ Etanol - UNICA.

Tabla 45: Disponibilidad teórica de bioetanol y disponibilidad estimada para la producción de SAF con base en las estimaciones para 2025²⁹⁶.

Países	Potencial teórico en 2025 (PJ)		Disponibilidad estimada para SAF en 2025 (PJ)	
	Caña de azúcar	Maíz	Caña de azúcar	Maíz
Argentina	-	16,00	-	0,85
Bahamas	-	-	-	-
Brasil	537,00	150,00	5,30	1,50
Chile	-	-	-	-
Colombia	8,30	-	-	-
República Dominicana	-	-	-	-
Ecuador	1,13	-	-	-
El Salvador	-	-	-	-
México	-	-	-	-
Panamá	-	-	-	-
Perú	3,40	-	-	-
Total	549,83	166,0	5,30	2,5

Como se muestra en la tabla anterior, Brasil domina la producción actual de bioetanol en América Latina. Ese país produce 686 PJ (32 500 millones de litros) al año. Tanto la caña de azúcar (325,7 Mt) como el maíz (15,5 Mt) se utilizan como materias primas para la producción de bioetanol en Brasil, siendo la caña de azúcar la materia prima dominante. La mayor parte del bioetanol producido, 609 PJ (28 800 millones de litros), se utiliza como combustible para el transporte por carretera en Brasil. El consumo interno de bioetanol como combustible alcanzará los 628 PJ (29 700 millones de litros) en 2024.

Argentina²⁹² (16 PJ, 760 millones de litros), Colombia²⁹⁷ (8 PJ, 400 millones de litros), Perú²⁹⁸ (3 PJ, 160 millones de litros) y Ecuador²⁹⁹ (1 PJ, 50 millones de litros) también han establecido industrias de producción de bioetanol, pero a una escala significativamente menor que la de Brasil.

En consonancia con el enfoque utilizado para el aceite de palma y el aceite de soya, se asume que el bioetanol que se consume actualmente como combustible para el transporte no está disponible para la producción de los SAF, con el fin de preservar los usos actuales de la energía renovable. Por consiguiente, solo se consideró que el bioetanol exportado estaba disponible para SAF. De los países evaluados, solo Brasil y Argentina son exportadores netos de bioetanol combustible, con exportaciones de 6,76 PJ (320 millones de litros) y 0,85 PJ (40 millones de litros), respectivamente. En este análisis, estos volúmenes se consideraron disponibles para la producción de SAF.

Perspectivas

Todos los países de LAC tienen el potencial de producir cultivos de azúcar y almidón adecuados para la producción de bioetanol. La producción del sector podría aumentar gracias a la mejora del rendimiento de los cultivos, tal y como lo pronostica la FAO en sus Proyecciones sobre la alimentación y la agricultura hasta 2050. Sin embargo, el aumento de la producción de etanol mediante el cultivo de más cosechas suscita preocupaciones sobre la seguridad alimentaria y el cambio en el uso del suelo, el agua y la naturaleza, lo que puede limitar el papel que pueden desempeñar los cultivos en la producción de etanol para aplicaciones de SAF.

El maíz de segunda cosecha ofrece una ruta prometedora para aumentar el suministro de etanol de forma sostenible. Cultivado entre las cosechas principales (normalmente soya), conlleva un menor riesgo de cambio en el uso del suelo y

²⁹⁶ Análisis de ICF.

²⁹⁷ USDA – Colombia Biofuels Annual 2025.

²⁹⁸ USDA – Peru Biofuels Annual 2025.

²⁹⁹ USDA – Ecuador Sugar Annual 2025, IICA - El estado de los biocombustibles líquidos en las Américas 2024.

recientemente ha sido certificado por el CORSIA como producto con bajo riesgo de cambio en el uso del suelo³⁰⁰. Sin embargo, la intensidad de carbono del maíz de segunda cosecha es mayor, lo que da lugar a una menor eficiencia energética por hectárea³⁰¹. En Brasil, se pronostica que la producción de etanol de maíz se duplique para 2032, impulsada en parte por el aumento del uso de maíz de segunda cosecha³⁰². Actualmente, hay 12 plantas adicionales de etanol de maíz en construcción en Brasil y otras nueve han recibido la aprobación reglamentaria³⁰².

A largo plazo, también es probable que el aumento de la electrificación del transporte por carretera lleve a que el bioetanol que se utiliza actualmente en el sector esté disponible para SAF. Por ejemplo, el ICCT ha desarrollado un escenario para una alta adopción de los vehículos eléctricos en Brasil, que sugiere que los vehículos eléctricos podrían representar el 70 % de las ventas de vehículos nuevos en el país para 2050³⁰³.

Dada la importancia de Brasil como productor de etanol, se llevó a cabo una evaluación para determinar el impacto del aumento del rendimiento de la caña de azúcar, el incremento de la producción de etanol de maíz y la adopción agresiva de vehículos eléctricos en el país sobre la disponibilidad a largo plazo de bioetanol para la producción de SAF.

En estas circunstancias, el análisis muestra que la producción total de bioetanol podría aumentar un 22 % para 2050, impulsada principalmente por el aumento de la producción de etanol de maíz³⁰⁴. Al mismo tiempo, una adopción agresiva de los vehículos eléctricos (en torno al 40 % de la automovilística³⁰⁵) podría reducir la demanda del sector del transporte por carretera en aproximadamente un 30 % para 2050. En conjunto, esto desbloquea 384 PJ de bioetanol para 2050 que podría utilizarse en la producción de SAF.

Dado que la mayoría de los demás países de LAC son importadores netos de bioetanol, es probable que cualquier aumento de la producción nacional sea consumido por los mercados existentes.

5.6.3.6 Etanol a partir de gases residuales

Los gases residuales de las acerías son subproductos de los procesos de fabricación del acero. Estos gases contienen componentes combustibles que pueden capturarse y utilizarse como energía o convertirse en biocombustibles. En concreto, en este análisis se considera el gas del horno básico de oxígeno (BOF) para su conversión en etanol, que luego puede convertirse en SAF mediante el proceso AtJ.

Tabla 46: Disponibilidad teórica de etanol y disponibilidad estimada para la producción de SAF con base en las estimaciones para 2025³⁰⁶.

País	Potencial teórico en 2025 (PJ)	Disponibilidad estimada para SAF en 2025 (PJ)
Argentina	2,3	0,28
Bahamas	-	-
Brasil	19,0	2,5
Chile	0,60	0,08
Colombia	0,84	0,10
República Dominicana	-	-
Ecuador	0,32	0,04

³⁰⁰ First ISCC Low Land Use Change Risk Certificate Issued - ISCC System.

³⁰¹ Según la retroalimentación de grupos de interés.

³⁰² Brazil's corn ethanol output projected to nearly double by 2032 on industry expansion | S&P Global Energy

³⁰⁴ The transition to electric vehicles in Brazil's automotive industry and its effects on jobs and income – ICCT 2025.

³⁰⁴ <https://unica.com.br/en/the-sector/ethanol/>, UNICA state that corn ethanol production could rise to 14 billion liters in 2033 from 8.2 billion liters in the 2024/2025 harvest season.

³⁰⁵ Según el escenario de electrificación del ICCT, las ventas de turismos eléctricos alcanzarán el 6 % de los vehículos nuevos en 2030, el 40 % en 2040 y el 70 % en 2050.

³⁰⁶ Análisis de ICF.

País	Potencial teórico en 2025 (PJ)	Disponibilidad estimada para SAF en 2025 (PJ)
El Salvador	0,05	0,01
México	8,0	1,1
Panamá	-	-
Perú	0,7	0,12
Total	33,5	4,23

Las estadísticas sobre la producción de acero bruto en América Latina para 2024 se obtuvieron del Instituto Aço Brasil³⁰⁷. Durante el proceso de fabricación del acero, se producen 100 Nm³ de gas BOF por cada tonelada de acero bruto³⁰⁸. En este análisis se asumió que el 70 % del acero bruto producido en LAC utiliza tecnología BOF y que, de ese porcentaje, el 75 % se utiliza actualmente para la recuperación de energía en las acerías, mientras que el 25 % restante se quema en antorchas³⁰⁹. Se asumió que los gases residuales que actualmente se queman en antorchas estarían disponibles para la producción de SAF, con una eficiencia de captura conservadora del 50 %. Según la bibliografía disponible, se asumió que se producen 0,64 toneladas de etanol por cada 1000 Nm³ de gas BOF. Los resultados de este análisis se resumen en la tabla anterior.

Este análisis muestra que existe un potencial moderado para producir etanol a partir de los gases residuales de las acerías tanto en Brasil como en México, según los supuestos descritos anteriormente. Sin embargo, cabe señalar que este análisis muestra la producción de gases residuales en todas las acerías de cada país. Los datos bibliográficos sugieren que, para ser viable, una planta de etanol debería producir 58 millones de litros de etanol al año³⁰⁸⁰⁹, lo que requeriría la generación de aproximadamente 72 millones de Nm³ de gases residuales en una sola planta. Por lo tanto, aunque existe potencial regional, la escala de generación de gases residuales en las acerías individuales puede ser insuficiente para sustentar una única planta de etanol comercialmente viable.

Perspectivas

Es poco probable que la disponibilidad de gases residuales de las acerías para la producción de SAF aumente con respecto a los niveles actuales, ya que, a nivel global, es probable que la industria avance hacia tecnologías con menores emisiones de carbono para satisfacer la demanda de productos bajos en carbono.

5.6.3.7 Desechos agrícolas

Los residuos agrícolas son los subproductos del cultivo y procesamiento de los cultivos que quedan después de que se ha cosechado o extraído el producto primario. Se pueden convertir en SAF mediante gasificación y rutas Fischer-Tropsch (FT), o mediante procesos Atj tras su conversión en etanol celulósico. Los residuos agrícolas se pueden dividir en dos categorías: residuos de campo y de procesamiento.

Los residuos de campo se generan en el campo durante la cosecha, normalmente a partir de cereales y otros granos como el arroz. Entre ellos se incluyen la paja y los tallos que quedan después de recolectar el producto principal. Una parte de estos residuos suele dejarse en el campo por razones de agronomía. Del mismo modo, una vez recogidos, estos residuos se utilizan a menudo en la ganadería. La fracción de estos residuos que no se requiere para ninguno de estos fines puede utilizarse para la generación de calor y energía o la producción de biocombustibles. Sin embargo, la recolección de estos residuos plantea un reto económico y logístico, ya que su generación se dispersa en sistemas agrícolas descentralizados.

Los residuos de procesamiento se generan en el lugar donde se procesa el cultivo primario. Entre ellos se incluyen cáscaras, vainas, mazorcas y bagazo. Los residuos del procesamiento pueden utilizarse en la alimentación animal y también se suelen emplear *in situ* para generar calor y energía para las operaciones de procesamiento. Los residuos de procesamiento que no se requieren para estos fines se consideran disponibles como materia prima para SAF.

En toda LAC, los residuos agrícolas que sobran después de cubrir estas necesidades suelen quemarse al aire libre, lo que contribuye a la contaminación atmosférica y a las emisiones de CO₂. Por lo tanto, redirigir este recurso a la

³⁰⁷ Estatística-da-Indústria-do-Aço_2o_TR1_2025.pdf.

³⁰⁸ https://www.safmaps.com/dbms-app/#off_gases_reports

producción de SAF no solo proporcionaría una materia prima renovable, sino que también aportaría beneficios medioambientales adicionales al sustituir la quema al aire libre por un uso de mayor valor en la jerarquía de residuos.

Para evaluar la disponibilidad de SAF derivada de residuos agrícolas, la metodología examinó inicialmente los datos de producción agrícola y ganadera de cada país dentro del alcance de este proyecto, utilizando el FAOSTAT³⁰⁹ como fuente de datos principal. En este análisis se identificaron y se tuvieron en cuenta los principales cultivos productores de residuos en cada país.

Se utilizaron las cifras medias de producción para el período 2019-2023 a fin de considerar cualquier influencia climática o medioambiental anual en la producción. Posteriormente, se identificaron los residuos primarios del campo y del procesamiento, junto con sus respectivas relaciones residuo-producto (RPR)^{310, 311, 312, 313}. El resultado final se obtiene sumando los residuos del campo y del procesamiento, tras tener en cuenta las asignaciones a la bioenergía no destinada al transporte, otras aplicaciones no relacionadas con la bioenergía y la parte de residuos que queda en el campo. Los residuos de campo y los residuos de procesamiento se consideraron por separado para garantizar que sus respectivas cadenas de valor se reflejaran con precisión.

Tabla 47: Disponibilidad teórica y disponibilidad estimada de residuos agrícolas para la producción de SAF con base en las estimaciones para 2025³¹⁴.

País	Potencial teórico en 2025 (PJ)	Disponibilidad estimada para SAF en 2025 (PJ)
Argentina	8.110,00	462,09
Bahamas	0,18	0,02
Brasil	19.818,00	1.215,00.
Chile	133,00	7,30
Colombia	374,00	27,83
República Dominicana	64,00	4,35
Ecuador	171,00	11,41
El Salvador	66,00	4,52
México	2.043,00	120,72
Panamá	32,00	2,09
Perú	279,00	69,33
Total	31.090,18	1.924,66

La disponibilidad de SAF derivada de residuos agrícolas se presenta en la tabla anterior. Los resultados muestran que Brasil posee una disponibilidad potencial de 1215 PJ, seguido por Argentina (462,09 PJ). Por el contrario, Ecuador, Chile, El Salvador, República Dominicana, Panamá y Bahamas presentan una disponibilidad inferior a 15 PJ.

³⁰⁹ FAOSTAT

³¹⁰ Sustainable Production of Second-Generation Biofuels (EN).

³¹¹ Microsoft Word - ldoc9385_orln_feedstock_potential_final_feb18.doc

³¹² Osei, I., Addo, A., & Kemausuor, F. (2021). *Crop residues utilisation for renewable energy generation in Ghana: Review of feedstocks assessment approach, conversion technologies and challenges*. *Ghana Journal of Technology*, 5(2), 29-42.

³¹³ Martínez-Valencia, L., & Valderrama-Ríos, C. *Sustainable Aviation Fuel Production in Colombia: Opportunities and Challenges*.

³¹⁴ Análisis de ICF.

Perspectivas

Aunque significativo, el potencial para aumentar la recolección y la valorización de los residuos agrícolas sigue, en gran medida, sin explotar. Las mejoras en las prácticas agrícolas, junto con el aumento de la conciencia respecto a los principios de la economía circular y el desarrollo de tecnologías de procesamiento descentralizadas, apuntan a un futuro en el que una mayor proporción de estos residuos podrá recolectarse y transformarse de forma rentable. Las políticas que promueven la agricultura sostenible y las soluciones de aprovechamiento energético de residuos impulsarán aún más este crecimiento.

5.6.3.8 Residuos forestales

Los residuos forestales son materiales orgánicos producidos por las industrias forestales y madereras existentes. Pueden gasificarse para producir SAF mediante una ruta FT, o utilizarse como materia prima para ATJ tras su conversión en etanol lignocelulósico. Los residuos forestales se pueden dividir en dos clases: residuos de la cosecha y residuos del procesamiento.

Los residuos de la cosecha incluyen tallos de pequeño diámetro con poco o ningún valor comercial, junto con ramas, astillas y otros materiales que suelen quedar en el suelo del bosque durante las operaciones de gestión forestal o tala. Dejar parte de este material en el bosque es esencial para mantener la biodiversidad, la fertilidad del suelo y el carbono del suelo. Sin embargo, algo de ese material puede recuperarse como parte de las operaciones forestales existentes, aunque esto suele requerir de una inversión adicional en infraestructura de recolección y transporte. En América Latina, especialmente en las zonas rurales, parte de este recurso también se utiliza como leña³¹⁵.

Los residuos de procesamiento son subproductos generados durante la transformación de la madera talada en aserraderos y otras instalaciones de procesamiento de madera. Estos incluyen el aserrín, la corteza, las astillas de madera, los trozos y las virutas. A diferencia de los residuos de la cosecha, los residuos de procesamiento se concentran en lugares centralizados y ya se utilizan a gran escala para aplicaciones que incluyen la bioenergía, la pulpa y los productos de paneles. Debido a estos usos existentes, los residuos de procesamiento no se incluyeron en este análisis, ya que su desviación hacia la producción de SAF podría competir con industrias establecidas, muchas de las cuales tienen prioridad según la jerarquía de residuos.

Los residuos forestales pueden generarse tanto en bosques primarios (naturales) como en bosques plantados con fines comerciales. Este análisis se centra únicamente en los residuos de bosques plantados, ya que estos se producen generalmente en un entorno más regulado y gestionado. Como resultado, existe una mayor probabilidad de que su recuperación se lleve a cabo de manera sostenible, con un menor riesgo de impactos negativos sobre la biodiversidad y las funciones del ecosistema. Por el contrario, se excluyeron los residuos de bosques primarios, ya que es mucho más difícil garantizar que su remoción sea sostenible o responsable desde el punto de vista medioambiental.

En este análisis, la disponibilidad potencial de residuos forestales de plantaciones de eucalipto y pino se estimó de la siguiente manera, según la metodología descrita por Agroicone³¹⁶:

$$\text{Residuos de la cosecha} = \text{Área sembrada} \times \text{Incremento anual medio} \times \text{Relación de residuos} \times \text{Tasa de recuperación}$$

Dónde:

- La superficie plantada es la superficie total de bosques plantados en cada país, expresada en hectáreas.
- El incremento medio anual (MAI) es la cantidad de biomasa producida por hectárea al año, específica para cada país y especie.
- La relación de residuos representa la proporción de biomasa cosechada que se convierte en residuos (por ejemplo, ramas, astillas, madera de tallos pequeños); y
- La tasa de recuperación es la fracción de esos residuos que se pueden recoger de manera viable, teniendo en cuenta las limitaciones ecológicas y operativas.

Los datos sobre la superficie de bosques plantados se obtuvieron del conjunto de datos sobre el uso³¹⁷ de la tierra de la FAO, excepto en el caso de Brasil, donde se utilizó un estudio específico sobre las plantaciones de eucalipto³¹⁸. La distribución de los bosques plantados entre eucaliptos y pinos, así como el MAI específico de cada país y las

³¹⁵ Astrid Schilman et al 2021 Environ. Res. Lett. 16 105012. DOI: 10.1088/1748-9326/ac28b2

³¹⁶ https://www.safmaps.com/dbms-app/pdfs/SAF_WOOD_RESIDUES_Final.pdf

³¹⁷ <https://www.fao.org/faostat/en/#data/RL>

³¹⁸ https://www.safmaps.com/dbms-app/#eucalyptus_reports

proporciones de residuos específicas de cada especie, se obtuvieron de la bibliografía. Por último, se asumió una tasa de recuperación del 50 % en todos los casos³¹⁶.

Ecuador, El Salvador, la República Dominicana y Panamá quedaron excluidos de este análisis debido a la superficie relativamente pequeña de sus bosques plantados y a la escasez de datos confiables. En estos países, la información disponible no distingue claramente entre las plantaciones comerciales destinadas a la producción de madera y las plantaciones establecidas con fines de conservación o restauración.

Según un estudio reciente de Agroicone, la mayor parte de los residuos de la cosecha se dejan actualmente en el campo, por razones económicas más que de agronomía³¹⁷. Por lo tanto, la estimación de los residuos forestales de la cosecha reportada en este estudio representa la disponibilidad potencial y supone que se podría contar con la logística y la infraestructura necesarias para apoyar su recolección. Agroicone también señala que, en ocasiones, se recolecta una pequeña cantidad de estos recursos para su uso en la generación de calor/energía por parte de las fábricas, aunque no aporta datos cuantitativos al respecto. En este análisis, asumimos de manera conservadora que el 30 % de los residuos de cosecha recolectados se utilizan para la generación de calor/energía y, por lo tanto, no están disponibles para SAF.

Tabla 48: Disponibilidad teórica y estimada de residuos forestales para la producción de SAF con base en las estimaciones para 2025³¹⁹

País	Potencial teórico en 2025 (PJ)	Disponibilidad estimada para SAF en 2025 (PJ)
Argentina	87,20	30,50
Bahamas	725,00	254,00
Brasil	215,00	75,00
Chile	27,60	9,70
Colombia	2,40	-
República Dominicana	5,67	-
Ecuador	0,69	-
El Salvador	10,60	3,71
México	0,54	-
Panamá	23,30	8,20
Perú	-	-
Total	1.098,00	381,11

Los resultados de este análisis se presentan en la anterior tabla y muestran que existe un potencial significativo para los residuos forestales como materia prima, especialmente en Brasil, donde podrían estar disponibles 254 PJ de residuos de la tala forestal cada año. En general, el 94 % de los residuos forestales de LAC se concentran en Brasil, Chile y Argentina. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, es importante señalar que estos valores representan la disponibilidad potencial; las limitaciones logísticas actuales, junto con los retos económicos que plantea el uso de residuos forestales para la producción de SAF, hacen que el suministro accesible sea considerablemente menor en la actualidad.

Perspectivas

El análisis presentado en la anterior tabla destaca el gran potencial del uso de residuos forestales como materia prima sostenible para la producción de SAF en LAC, siempre que se desarrolle la infraestructura necesaria para su recolección, transporte y procesamiento y se mantengan las restricciones ecológicas, como la salud del suelo y la biodiversidad.

5.6.3.9 Desechos sólidos urbanos

Los desechos sólidos urbanos (RSU) son una materia prima diversa que comprende varios flujos de desechos, como alimentos, verduras, plásticos, papel, cartón, entre otros. La recolección y gestión de desechos, los

³¹⁹ Análisis de ICF.

patrones de composición, el tamaño y la densidad de la población influyen en las características de los RSU. Por consiguiente, la composición de los residuos sólidos urbanos varía considerablemente entre países y ciudades³²⁰.

Actualmente, una parte significativa de los desechos sólidos urbanos a nivel global se gestiona de forma inadecuada, ya que al menos un tercio se vierte o se quema al aire libre. Esto supone una oportunidad global para producir SAF a partir de desechos urbanos, mejorando las prácticas de gestión de residuos y contribuyendo al mismo tiempo a la reducción de emisiones de la aviación³²¹. La producción de SAF a partir de RSU mediante tecnología FT consiste en evitar las emisiones que se producirían por la descomposición de los residuos en los vertederos. Al convertir la fracción biogénica de los desechos sólidos urbanos en combustibles sustitutivos, se puede reducir la huella de carbono del ciclo de vida del transporte aéreo³²².

La evaluación del MSW se llevó a cabo basándose en un modelo detallado del ICF. En la práctica, el modelo RSU utiliza datos del Grupo del Banco Mundial³²³ para establecer una relación a nivel nacional entre la población histórica y el PIB con el fin de pronosticar el volumen, la composición y el destino de los desechos de cada país. Esta herramienta tiene en cuenta todos los desechos, tanto los no recogidos como los reciclados y compostados, la incineración, el vertido en vertederos y otras especificaciones adecuadas para la producción de SAF.

La siguiente tabla muestra la disponibilidad de SAF considerando los desechos sólidos urbanos como materia prima. Como se ha señalado, este análisis se realizó basándose en la generación de desechos y el PIB per cápita. Por lo tanto, la disponibilidad de SAF derivada de los desechos sólidos urbanos es mayor en Brasil (558 PJ), seguida de México, Argentina y Colombia.

Tabla49: Disponibilidad teórica de RSU y disponibilidad estimada para la producción de SAF con base en las estimaciones para 2025³²⁴

País	Potencial teórico en 2025 (PJ)	Disponibilidad estimada para SAF en 2025 (PJ)
Argentina	249,60	114,00
Bahamas	3,60	1,20
Brasil	1.092,00	558,00
Chile	98,40	57,60
Colombia	177,60	75,60
República Dominicana	63,60	28,80
Ecuador	80,40	33,60
El Salvador	24,00	14,40
México	732,00	237,60
Panamá	24,00	13,20
Perú	127,20	55,20
Total	2.672,40	1.189,20

³²⁰ Gueboudji, Z., Mahmoudi, M., Kadi, K., & Nagaz, K. (2024). *Characteristics and impacts of municipal solid waste (MSW): A review. Technical Landfills and Waste Management: Volume 1: Landfill Impacts, Characterization and Valorisation*, 115-134.

³²¹ Kafle, S., Karki, B. K., Sakhakarmy, M., & Adhikari, S. (2025). *A Review of Global Municipal Solid Waste Management and Valorization Pathways. Recycling*, 10(3), 113.

³²² How all sustainable aviation fuel (SAF) feedstocks and production technologies can play a role in decarbonising aviation | News and views | Air bp.

³²³ Población, total. Datos.

³²⁴ Análisis de ICF.

A pesar de los retos asociados a su uso, los RSU han demostrado su potencial para la producción de combustibles alternativos sostenibles. La mejora de las prácticas de gestión de desechos podría dar lugar a un aumento de la disponibilidad de desechos municipales e industriales. Los biocombustibles y la bioenergía se han convertido en soluciones viables gracias a la valorización de residuos. Los marcos de trabajo de economía circular y bioeconomía se identifican como factores claves que dan forma a estrategias alternativas para los residuos en la región de América Latina y el Caribe³²⁵.

Perspectivas

La producción de RSU está directamente relacionada con el crecimiento demográfico y la urbanización, las cuales son tendencias constantes en América Latina. A medida que las ciudades se expanden y mejoran las prácticas de gestión de residuos (dejando atrás rellenos sanitarios y adoptando enfoques más circulares), se espera que aumente significativamente la disponibilidad de RSU como materia prima para la recuperación de energía y la producción de SAF. Los cambios en las políticas con tendencia hacia el aprovechamiento energético de residuos y la recuperación de recursos serán factores claves.

5.6.4 Materias primas emergentes y oportunidades futuras

Este estudio se ha centrado en los datos más confiables de la región para garantizar el mayor grado de precisión posible. Sin embargo, existe la limitación de que en el futuro se puedan desarrollar nuevas materias primas y tecnologías, lo que ofrecería un potencial adicional. En la siguiente sección se destacan cuatro casos prácticos.

5.6.4.1 Macauba

La palmera macauba (*Acrocomia aculeata*) es una palma productora de aceite originaria de América tropical que presenta una fructificación intensa, lo que se traduce en un alto rendimiento de frutos y aceite. Los estudios demuestran que su eficiencia en la conversión de energía por hectárea supera a la de los cultivos energéticos tradicionales, como la caña de azúcar, la palma aceitera, el girasol, el maíz y la jatrofa³²⁶. Por ejemplo, se ha demostrado que es entre 7 y 10 veces más productivo por hectárea plantada que la soya³²⁷.

El Banco Nacional de Desarrollo Económico y Social (BNDES) ha aprobado una financiación de 257,9 millones de reales brasileños para la creación del Acelen Agripark, un centro de innovación tecnológica dedicado a la investigación y el desarrollo de la macauba. Esta iniciativa forma parte del proyecto integrado de Acelen para producir diésel renovable y SAF, centrado en la domesticación de la macauba y su cultivo en tierras degradadas³²⁸.

Estas cifras sugieren la viabilidad de integrar el cultivo de macauba en estrategias más amplias de gestión sostenible de la tierra, utilizando porciones mínimas de tierra infrutilizada y permitiendo la coexistencia con otras iniciativas de rehabilitación sin competencia sustancial. Actualmente, la macauba no figura en la lista de combustibles aptos del CORSIA de la OACI.

5.6.4.2 Sargazo

El sargazo, también conocido como *Sargassum*, es un tipo de alga marrón que periódicamente llega a las costas de la región del Caribe en grandes cantidades. El sargazo se ha convertido en un problema medioambiental debido a su proliferación sin precedentes en los últimos años. Estas densas capas de algas se acumulan a lo largo de las costas, cubriendo las playas, afectando al turismo, perjudicando a la pesca local y liberando gas sulfhídrico al descomponerse, lo que puede afectar a la calidad del aire y a la salud humana. La gestión y eliminación del sargazo se ha convertido en un problema urgente para muchos países del Caribe.

A pesar de estos retos, el sargazo también representa una oportunidad como posible materia prima para SAF. Su rápida tasa de crecimiento, abundancia y el hecho de que no dependa de tierras cultivables lo convierten

³²⁶ Ulloa-Murillo, L. M., Villegas, L. M., Rodríguez-Ortiz, A. R., Duque-Acevedo, M., & Cortés-García, F. J. (2022). *Management of the organic fraction of municipal solid waste in the context of a sustainable and circular model: Analysis of trends in Latin America and the Caribbean*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(10), 6041.

³²⁶ https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/20207/1/IIASA-WWF_Sustainable-Aviation-Fuels_South-America.pdf

³²⁷ <https://h2businessnews.com/brasil-acelen-anuncia-la-primera-extraccion-industrial-de-aceite-de-macauba-para-combustibles/>

³²⁸ [https://agenciadenoticias.bndes.gov.br/socioambiental/BNDES-aprova-R\\$-258-mi-a-Acelen-para-inovacao-e-desenvolvimento-da-macauba-para-combustiveis/](https://agenciadenoticias.bndes.gov.br/socioambiental/BNDES-aprova-R$-258-mi-a-Acelen-para-inovacao-e-desenvolvimento-da-macauba-para-combustiveis/)

en un recurso renovable muy atractivo. Sin embargo, la recolección de sargazo a gran escala plantea numerosas dificultades prácticas, entre ellas su alto contenido de humedad, que complica su procesamiento, transporte y transformación posterior, y los obstáculos logísticos que supone la recolección de biomasa mixta, a menudo arenosa, en las costas. Además, hay una falta de datos e investigaciones exhaustivos sobre las rutas de conversión y la viabilidad económica de la producción de combustibles de aviación sostenibles a partir del sargazo. En la actualidad, aunque se reconoce su potencial, se necesitan avances científicos y técnicos significativos antes de que el sargazo pueda contribuir de manera significativa a la cadena de suministro de SAF.

El sargazo se ha convertido en una posible materia prima para la producción de SAF en México, las Bahamas y la República Dominicana, lo que se ajusta a los objetivos generales de sostenibilidad de la región³²⁹. Actualmente, el sargazo no figura en la lista de combustibles aptos del CORSIA de la OACI.

5.6.4.3 Cultivos intermedios: camelina

Los cultivos de cobertura e intermedios, como la camelina, ofrecen un enfoque sostenible al aprovechar las tierras cultivables infrautilizadas sin comprometer la salud del suelo ni la producción agrícola existente. A diferencia de los sistemas de cultivos múltiples, en los que se cultivan dos o más cultivos comerciales primarios de forma secuencial o simultánea en la misma tierra, los cultivos de cobertura se plantan normalmente entre los cultivos principales o durante los períodos de barbecho y su objetivo principal es proporcionar beneficios medioambientales, aunque también pueden cosecharse para obtener productos de valor añadido, como los SAF. Cuando se cultiva bajo estrictos estándares medioambientales, la camelina ofrece nuevas oportunidades a los agricultores locales y aumenta la disponibilidad de materias primas energéticas, al tiempo que evita la competencia con los cultivos alimentarios y preserva los paisajes naturales.

Según datos de desarrolladores locales³³⁰, la superficie total apta para el cultivo de camelina se estima en alrededor de 30 millones de hectáreas en Argentina, Brasil, Uruguay y Paraguay. Sin embargo, esto representa un potencial máximo, y es probable que el área viable sea menor una vez que se tengan en cuenta la idoneidad climática y otras limitaciones agronómicas, aunque aún no se dispone de datos específicos. Por ejemplo, en Argentina, el área susceptible de ser tratada se estima en 13,6 Mha, pero el área realmente viable se aproxima más a los 11 Mha.

El rendimiento de aceite por hectárea es muy variable, oscilando entre 400 y 800 kg/ha. Suponiendo un rendimiento medio de 600 kg/ha, la producción potencial máxima podría alcanzar aproximadamente 18 Mt de aceite. Esto representa un importante recurso energético adicional, que podría servir tanto a la aviación como a otros mercados fuera de la región. Sin embargo, cabe señalar que es poco probable que la implementación en el mundo real alcance estas estimaciones máximas. Estas cifras tienen como único objetivo proporcionar una indicación de las áreas potenciales para una mayor exploración y desarrollo.

5.6.4.4 Hierbas perennes

Las hierbas perennes, como el *Miscanthus* y el pasto varilla, son materias primas reconocidas³³¹ por el CORSIA. Pueden ser especialmente atractivas para la producción de SAF desde el punto de vista medioambiental comparadas con otras materias primas derivadas de cultivos, ya que tienen un alto rendimiento anual, requieren insumos mínimos (por ejemplo, agua, fertilizantes, etc.) y pueden cultivarse en tierras marginales, degradadas³³² o infrautilizadas. La hierba elefante también se está perfilando como una materia prima perenne prometedora, especialmente en las regiones tropicales, para suministrar biomasa para biocombustibles avanzados. Sin embargo, la comercialización de hierbas perennes para la producción de SAF se encuentra en fase inicial. Recientemente, Jord, una empresa especializada en el cultivo de biomasa C4 de hierbas en tierras marginales o degradadas de Senegal y la República Dominicana, anunció una alianza con el desarrollador de tecnología de biorrefinado Votion Biorefineries con el objetivo de desarrollar SAF a partir de hierbas C4³³³.

³²⁹ Comunicaciones personales durante las reuniones de compromiso (SEMARNAT).

³³⁰ Datos proporcionados a ICF por Camelina Company basados en estudios propios.

³³¹ <https://www.icao.int/environmental-protection/saffeedstocks>

³³² Role of Energy Grasses – Sustainable Biofuels in the UK and Europe - Haush.

³³³ Sweden's Jord, Votion team up to produce SAF from C4-grass | SAF Investor.

5.6.5 Resumen de los resultados

Los resultados del análisis de la disponibilidad de materia prima se presentan en la Tabla 50. Este análisis muestra que Brasil es el país con mayor potencial para la producción de SAF, con 2046 PJ de materia prima potencialmente disponible. Argentina (642 PJ) y México (367 PJ) también cuentan con recursos notables.

Las materias primas derivadas de cultivos, el UCO y las grasas animales se encuentran limitadas actualmente ya que se destinan en gran medida a mercados existentes, tales como la producción de biodiésel o aplicaciones alimentarias. Una excepción notable es el aceite de soya en Argentina, donde las importantes exportaciones para biodiésel crean oportunidades potenciales para que sea dirigido hacia SAF en condiciones de mercado cambiantes. A medio y largo plazo, la disponibilidad de estas materias primas podría aumentar si la electrificación del transporte por carretera reduce la demanda de combustibles convencionales.

Las materias primas emergentes, en particular los residuos agrícolas, representan un recurso sustancial sin explotar. Nuestro análisis sugiere que se podrían movilizar 1924 PJ de residuos agrícolas para la producción de SAF en toda la región, incluso después de tener en cuenta los usos actuales de bioenergía y no bioenergía. Esto destaca la importancia de desarrollar cadenas de suministro, incluidas las infraestructuras de recolección, almacenamiento y transporte, para transformar este potencial en capacidad práctica de producción de SAF, aunque estas cadenas de suministro suelen ser complejas y pueden resultar costosas. Para aprovechar este potencial probablemente se necesitarán políticas focalizadas, incentivos a la inversión y coordinación con los grupos de interés del sector agrícola y de bioenergía.

En general, el análisis regional revela una estrategia dual: la explotación a corto plazo de aceites vegetales infrutilizados en contextos específicos, junto con el escalonamiento a medio y largo plazo de los residuos mediante el desarrollo de la cadena de suministro y marcos de trabajo regulatorios de apoyo.

Tabla 50: Resumen de la disponibilidad aproximada de materia prima para SAF basada en las estimaciones de producción para 2025, PJ

Materia prima	Argentina	Brasil	Chile	Colombia	Rep. Dominicana	Ecuador	El Salvador	México	Panamá	Perú	Bahamas
UCO	1,7	5,4	0,24	1,6	0,5	0,7	0,0	3,2	0,0	0,6	0,0
Grasas animales	1,3	5,1	0,1	1,0	-	-	0,0	1,0	-	0,2	-
Aceite de palma	-	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aceite de soya	31,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bioetanol a partir de caña de azúcar y maíz	0,9	6,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Etanol a partir de gases residuales	0,3	2,5	0,1	0,1	-	0,0	0,0	1,1	-	0,1	-
Residuos agrícolas	462,0	1.215,0	7,3	27,8	4,4	11,4	4,5	120,0	2,1	69,3	0,0
Residuos forestales	30,5	254,0	75,2	9,7	-	-	-	3,7	-	8,2	-

Materia prima	Argentina	Brasil	Chile	Colombia	Rep. Dominicana	Ecuador	El Salvador	México	Panamá	Perú	Bahamas
Desechos sólidos urbanos	114,0	558,0	57,6	75,6	28,8	33,6	14,4	238,0	13,2	55,2	1,2
Total	642	2.047	141	116	34	46	19	367	15	134	1,2

Nota: valores redondeados a un decimal. Totales redondeados al número entero más cercano.

5.7 Metodología de cálculo de precios de SAF y supuestos de los pronósticos

Resumen del precio de SAF

La industria de los SAF se encuentra aún en fase inicial de desarrollo en comparación con el mercado convencional de combustibles para aviación, en el que existen mecanismos de precios transparentes desde hace muchos años. La producción global de SAF sigue siendo limitada, lo que da lugar a una volatilidad de los precios que refleja varios factores influyentes, como el tipo de combustible, la ubicación y las modalidades de compra (incluidos contratos al contado contra contratos a largo plazo).

Este análisis adopta un **precio calculado para SAF** que incorpora una serie de componentes, entre los que se incluyen el costo directo de producción, los retornos anticipados de la inversión y los gastos logísticos asociados a actividades como la mezcla, el transporte y el almacenamiento, así como los costos administrativos.

En la actualidad, se observa a menudo una prima de mercado para SAF, lo que refleja su disponibilidad limitada, la fase inicial de desarrollo del mercado y las complejidades que conlleva la expansión de las cadenas de suministro en comparación con el combustible convencional para aviones. Aunque existe dicha prima de mercado, resulta difícil proyectar las condiciones del mercado y reflejarlas con precisión puesto que se han observado grandes fluctuaciones. No obstante, se espera que esta prima disminuya con el tiempo a medida que el mercado madure, aumenten los volúmenes de producción, se produzcan avances tecnológicos y evolucionen los marcos de trabajo regulatorios. Se espera que esto lleve a una convergencia del precio de mercado hacia el precio calculado para SAF. El objetivo de esta sección es ofrecer información sobre esta dinámica centrándose en el precio calculado de SAF, lo que proporciona una base para evaluar la viabilidad económica y el potencial futuro de las rutas de SAF en la región.

5.7.1 Metodología

Se desarrolló un modelo integral técnico-económico de flujo de caja descontado (DCF por sus siglas en inglés) para estimar el precio de diferentes tipos de SAF en LAC. El análisis establece una línea base de precio mínimo de venta del combustible (MFSP por sus siglas en inglés) que refleja los costos relacionados con la producción, la logística, la distribución y la certificación.

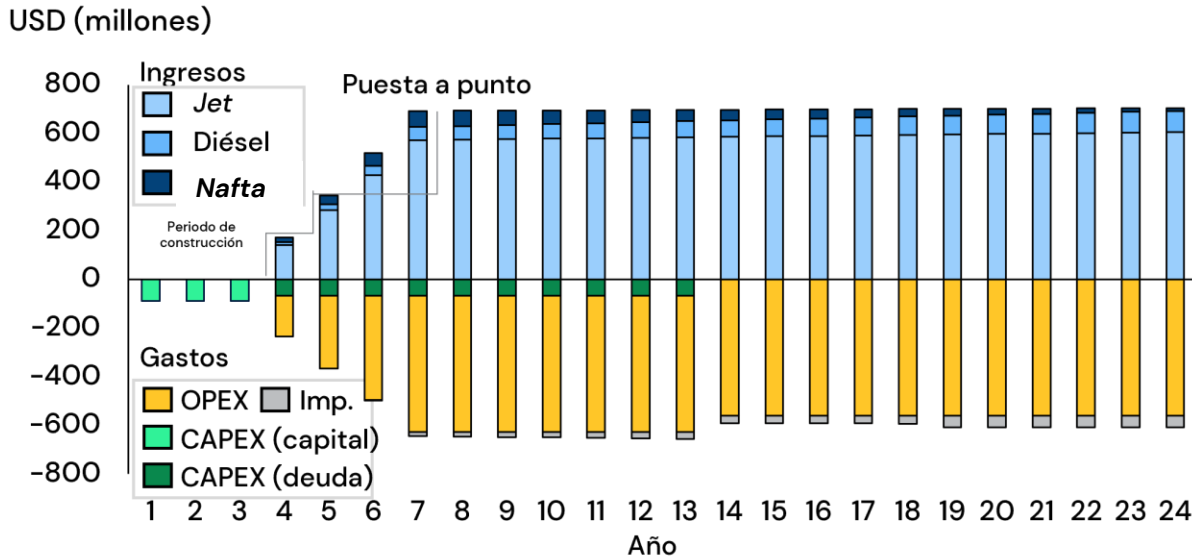
El modelo se centra en los factores claves que influyen en los precios, como el costo de producción, que depende de la inversión de capital, la elección de las materias primas y las configuraciones tecnológicas, así como los gastos operativos, logísticos y administrativos. Refleja los retos que plantea el desarrollo de instalaciones de SAF, especialmente en el caso de rutas que aún están emergiendo o que tienen una implementación comercial limitada. Las estimaciones de costos se basan en supuestos consolidados con la intención de ofrecer una visión representativa de la economía de precios en la región. Si bien algunos parámetros se adaptan a países específicos, las características individuales de cada proyecto pueden dar lugar a variaciones con respecto a estas estimaciones.

El modelo del ICF permite calcular el precio mínimo de venta (MFSP) por tecnología y por país. El modelo asume un período de construcción de tres años para una instalación, seguido de una fase de aumento gradual de la producción. Los principales componentes del costo incluyen:

- Costos de capital (divididos en capital y deuda)
- Gastos operativos (incluidos servicios públicos, materias primas y costos fijos)
- La tasa del impuesto de sociedades sobre los beneficios

Los ingresos se generan a partir de las ventas de SAF y coproductos como el diésel renovable y la nafta. La siguiente figura ilustra un ejemplo de las perspectivas de flujo de caja anual para una posible instalación cuya construcción comenzaría en 2025.

Ejemplo de las perspectivas de flujo de caja para unas instalaciones de AtJ de caña de azúcar en Brasil

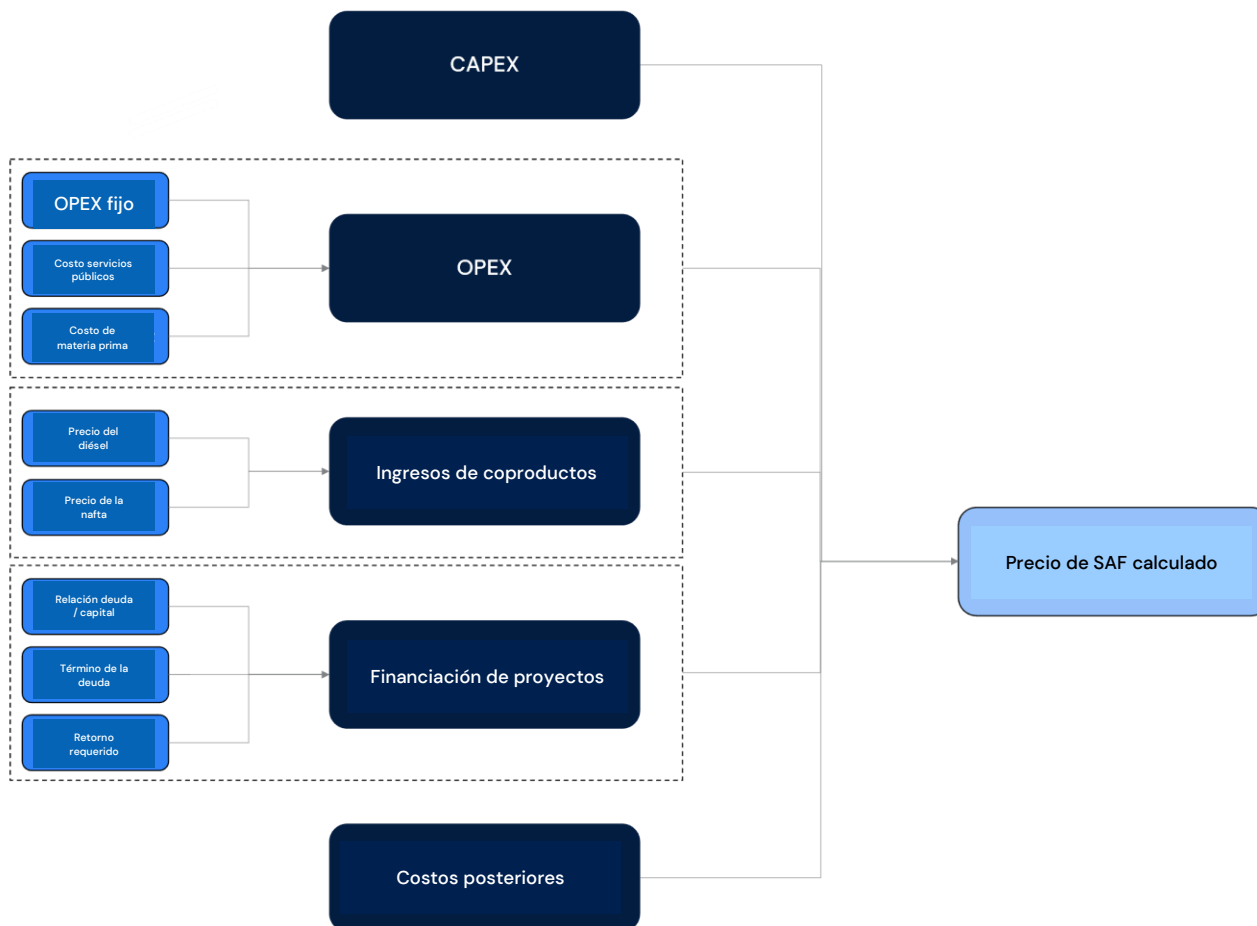


Fuente: incluye datos del S&P Global Energy, ©2025 del S&P Global Inc., IEA. Análisis de ICF.
 Supuestos: periodo de construcción de tres años, periodo de puesta a punto de tres años hasta lograr toda la capacidad de producción, veinte años de vida operativa, tasa de impuesto corporativo de ganancias en Brasil del 34%.
 AtJ = Alcohol-to-Jet

El modelo se ajusta a todas las combinaciones de país, materia prima, tecnología y año de construcción dentro del plazo previsto (hasta 2050), lo que permite obtener una perspectiva dinámica del flujo de caja para cada instalación. A continuación, se calcula el MFSP necesario para que SAF alcance un valor presente neto (VAN) de cero a la tasa interna de retorno (TIR) objetiva. Determinar el precio estimado de SAF para cada materia prima, país y tecnología, suponiendo plazos de construcción en intervalos de cinco años, permite realizar un análisis agregado posteriormente. Aunque los supuestos financieros varían según el país, los resultados se presentan a nivel agregado para mayor claridad. Los costos logísticos y administrativos se añaden para alcanzar el precio de SAF calculado.

La siguiente figura presenta la arquitectura del modelo y los flujos de insumos que alimentan el precio final calculado por SAF. Estos aportes y supuestos se analizan en detalle en las siguientes secciones. El modelo asume una instalación con una capacidad nominal anual de 132 132 mmgpy (0,4 Mt), un plazo de construcción de tres años y un período de puesta a punto hasta alcanzar la plena producción operativa. Se realizan ajustes para tener en cuenta posibles periodos de inactividad y se asume una vida útil de 20 años.

Diagrama de flujo de insumos / producción del modelo de cálculo de precio de SAF



5.7.2 CAPEX y OPEX fijos

5.7.2.1 CAPEX

El gasto de capital (CAPEX) representa una parte importante de la inversión inicial para una planta de producción de SAF. El CAPEX incluye todos los gastos necesarios para diseñar, obtener las licencias, adquirir, construir y poner en marcha la planta física antes de que comience la producción de SAF. Estos costos cubren los estudios de ingeniería, la gestión del proyecto, la adquisición de terrenos, las obras civiles (como cimientos y edificios), la compra e instalación de equipos de proceso (reactores, columnas, separadores, compresores), la infraestructura eléctrica, la instrumentación y los sistemas de seguridad. Los gastos indirectos, incluidos los permisos, los honorarios legales y las contingencias para imprevistos relacionados con la construcción, también forman parte del CAPEX.

El importe y la estructura de estos costos dependen de la ruta tecnológica SAF elegida. Por ejemplo, las plantas basadas en el proceso HEFA, a menudo adaptadas a partir de instalaciones de biodiésel existentes, suelen requerir menos CAPEX en comparación con las plantas basadas en síntesis FT, PtL y AtJ. Cada tecnología tiene sus propios requisitos de ingeniería, necesidades de cadena de suministro y demandas de mano de obra y equipos especializados. La síntesis FT, que convierte la biomasa o los residuos en gas de síntesis antes de producir hidrocarburos líquidos, requiere reactores de alta temperatura y unidades de tratamiento de gases. El PtL requiere electrolizadores y unidades de síntesis y mejora, mientras que el AtJ se basa en tecnologías de fermentación y mejora. Como resultado, los costos de capital pueden variar considerablemente, desde decenas de millones hasta varios cientos de millones de dólares para una instalación a escala comercial.

El CAPEX también varía según la ubicación debido a los costos locales de construcción, las habilidades de la mano de obra y la disponibilidad de infraestructuras. Las economías de escala y las capacidades establecidas en materia de ingeniería y construcción pueden reducir los costos, mientras que los proyectos en entornos menos industrializados pueden enfrentar costos más elevados debido a la importación de equipos o conocimientos especializados.

Con el tiempo, se espera que disminuya el CAPEX para las instalaciones de SAF. Este cambio está impulsado por una mayor implementación de las tecnologías SAF, lo que se traduce en una mayor experiencia y eficiencia durante la ejecución de los proyectos. La estandarización de los diseños de equipos y plantas puede reducir aún más los costos, ya que los proveedores ofrecen soluciones ya preparadas y los equipos de proyecto se benefician de una menor necesidad de ingeniería personalizada. Los avances en la tecnología de procesos, como las mejoras en los catalizadores, una mejor integración de los coproductos o un mayor control de los procesos, pueden reducir los requisitos de equipamiento e instalación. El aumento del número de trabajadores cualificados y el mayor desarrollo de las cadenas de suministro locales también pueden reducir los costos relacionados con la mano de obra especializada y los componentes importados. El ritmo de reducción de las inversiones de capital dependerá de factores como el desarrollo tecnológico, la experiencia del sector y la situación económica general. En general, las perspectivas sugieren que las instalaciones de SAF serán cada vez más asequibles y viables para una gama más amplia de mercados e inversionistas.

Este análisis utiliza las proyecciones de costos de CAPEX elaboradas por la Asociación Internacional de Transporte Aéreo (IATA), que incluyen los costos de capital históricos (2020) y pronosticados por tecnología hasta 2045 como línea base³³⁴. Para mantener la consistencia, los valores comunicados para las producciones específicas de SAF se convirtieron a CAPEX por tonelada de capacidad nominal, con ajustes basados en el rendimiento. Se aplicó una interpolación para estimar los cambios anuales en los costos de capital, lo que permitió al modelo reflejar estas variaciones según la fecha de construcción prevista para cada planta y evaluar cómo la evolución de los gastos de capital puede influir en los costos de producción de SAF y, por consiguiente, en los precios. El ICF refinó aún más los costos de capital proyectados por unidad de producción, reflejando la realidad del mercado para una planta basada ³³⁵en el proceso HEFA. Además, el costo indicado en el estudio de la IATA para la tecnología FT corresponde a una instalación piloto, mientras que el presente estudio se basa en una planta a escala comercial, lo que se traduce en un menor costo de capital. Se adoptan costos más elevados en el modelo en comparación con las cifras originales de la IATA, lo que muestra las posibles ineficiencias esperadas en la región en comparación con mercados más desarrollados.

Tabla 51: Evolución de los costos de CAPEX por tecnología (USD/galón de capacidad nominal)

Tecnología	Unidad	2020	2035	2045
HEFA	USD/galón	2,54	2,47	2,43
AtJ	USD/galón	6,43	5,79	3,86
FT	USD/galón	44,10	26,46	26,46
PtL	USD/galón	41,73	17,76	17,38

5.7.2.2 OPEX fijos

Los costos operativos fijos, como el mantenimiento, la mano de obra, los seguros, los permisos y los gastos de venta, generales y administrativos (SG&A), suelen expresarse como porcentaje del CAPEX, ya que varían en función del tamaño y la complejidad de las instalaciones. Estos costos suelen ser relativamente estables de un año a otro y no varían significativamente con el volumen de producción. El mantenimiento y la mano de obra suelen representar las partes más importantes, seguidas por los seguros y los impuestos sobre la propiedad. La siguiente tabla resume las cuotas de costos fijos asumidas por ruta tecnológica.

³³⁴ <https://www.iata.org/contentassets/8d19e716636a47c184e7221c77563c93/finance-net-zero-roadmap.pdf>

³³⁵ Costo real comunicado por Neste para el desarrollo de una refinería de SAF basada en HEFA en Singapur - <https://www.neste.com/news/neste-oil-starts-up-its-new-renewable-diesel-plant-in-singapore>

Tabla52: Valores fijos de OPEX para las instalaciones por tecnología ³³⁶

Componente	% de CAPEX anual	HEFA	AtJ	FT	PtL
Mantenimiento	%	1,5	1,5	2	1,5
Mano de obra	%	1	1,5	1,2	1
G&A	%	0,5	0,15	0,15	0,5
Seguro	%	0,75	0,75	0,75	0,75
Impuesto sobre la propiedad	%	1	1	1	1
Mantenimiento importante	%	1	1	1	1
Total	%	5,75	5,9	6,4	5,0

5.7.3 OPEX variable (servicios públicos y materias primas)

Los costos operativos variables de una instalación SAF se refieren a los gastos que fluctúan en función de los niveles de producción. Las materias primas son el principal factor contribuyente, incluyendo el UCO, grasas animales, residuos agrícolas, RSU y otros insumos descritos en la sección 5.6. Los costos de las materias primas dependen del tipo y la disponibilidad, y pueden verse influidos por factores estacionales o la competencia de otras industrias. El consumo de energía (servicios públicos) es otro componente importante, ya que la producción de SAF a menudo implica procesos como el hidrotreamiento o la síntesis Fischer-Tropsch, que requieren electricidad y calor. Para los SAF de PtL, la electricidad renovable utilizada para producir hidrógeno verde mediante electrólisis es un factor clave en los costos. La fuente de energía, ya sea de la red eléctrica o renovable, afecta tanto al costo como a la intensidad de carbono.

5.7.3.1 Servicios públicos

Para las tecnologías del proceso HEFA, AtJ y FT, se asumieron cuatro servicios públicos principales: electricidad, gas natural, hidrógeno y oxígeno. El requerimiento energético varía según la tecnología del proceso y, por lo tanto, influye en los costos asociados. La siguiente tabla resume los requisitos energéticos asumidos por tecnología.

³³⁶ <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/general-publications/state-eu-saf-market-2023>

Tabla53: Requisitos energéticos por tecnología ³³⁷

Servicio público	Unidad/galón de combustible producido	HEFA	AtJ	FT
Electricidad	kWh	0,09	1,42	0,38
Gas natural	MMBtu	0,01	0,02	-
Hidrógeno	t de H ₂	1,4 x 10 ⁻⁴	3,0 x 10 ⁻⁵	-
Oxígeno	t de O ₂	-	-	0,01

Conocer los servicios públicos necesarios para producir un galón de combustible permite calcular el costo anual asociado a dichos servicios para el tamaño específico de la instalación del modelo. Al vincular los requisitos de servicios públicos con el precio de cada uno y la producción anual de la instalación, se obtiene el costo anual de servicios públicos. Se utilizaron diversas fuentes para obtener los precios regionales de la energía³³⁸.

Para la tecnología de PtL, se asumieron cuatro servicios públicos principales: electricidad renovable, insumos químicos, agua y eliminación de aguas residuales³³⁹. El costo nivelado de la electricidad (LCOE) se evaluó país por país, siempre y cuando se tuvieran los datos³⁴⁰. Esto implicó calcular un LCOE de media ponderada para la energía solar fotovoltaica, la energía eólica terrestre y la energía hidroeléctrica renovable basándose en la combinación de generación actual de cada país y aplicando las reducciones de costos previstas a través de las curvas de aprendizaje tecnológico. Cuando no se disponía de datos sobre el LCOE a nivel de país, se aplicaron los valores regionales.

Por lo general, se requieren otros servicios públicos para las operaciones de SAF; sin embargo, su contribución al costo total de los servicios públicos es limitada y no se han modelado en este estudio.

5.7.3.2 Materias primas

Los costos de las materias primas suelen representar una parte considerable del gasto operativo total. Los avances tecnológicos en la recolección y el procesamiento, como la mejora en la recuperación del UCO, la clasificación de RSU y la logística de residuos agrícolas, pueden afectar tanto a la disponibilidad como al costo a lo largo del tiempo. La dinámica del mercado también influye en los precios de las materias primas. La mayoría de las materias primas utilizadas para la producción de SAF se comercializan como productos básicos, lo que significa que sus costos fluctúan en función del equilibrio entre la oferta y la demanda, la evolución geopolítica y las políticas comerciales. Cuando la disponibilidad es limitada o aumenta la competencia de otras aplicaciones industriales, los precios pueden subir. Por el contrario, el acceso generalizado a determinadas materias primas puede ejercer una presión a la baja sobre los costos. También existen variaciones regionales en los precios de las materias primas debido a la disponibilidad de recursos locales, la infraestructura y los entornos regulatorios. Por ejemplo, algunas regiones han establecido cadenas de suministro y programas de incentivos que pueden influir en los costos, mientras que otras pueden sufrir limitaciones logísticas que se traducen en precios más elevados. Además, la estacionalidad y los patrones climáticos pueden influir en la producción y recolección de ciertos tipos de biomasa o materias primas derivadas de residuos. Con el tiempo, es posible que el perfil general del costo de las materias primas cambie a medida que se adopten nuevas tecnologías, mejoren las tasas de reciclaje y evolucionen las condiciones del mercado. El monitoreo de estos factores puede

³³⁷ Electricidad, gas natural e hidrógeno según modelos internos de ICF. Hidrógeno basado en <https://cs3.mit.edu/publication/118414>

³³⁸ Costos de electricidad por país (diciembre de 2024) - https://www.globalpetrolprices.com/electricity_prices/; Oxígeno: supuesto del ICF; Hidrógeno: <https://cs3.mit.edu/publication/118414>

³³⁹ Energía renovable y consumo de agua, costo de productos químicos y generación de aguas residuales según modelos internos del ICF; costos de tratamiento de agua y aguas residuales según <https://iwaponline.com/h2open/article/3/1/355/76768/Drivers-of-change-in-urban-water-and-wastewater>.

³⁴⁰ LCOE por país y región según IRENA, 2024; generación de energía renovable según <https://pxweb.irena.org/pxweb/en/IRENASTAT/>; tendencias futuras del LCOE según NREL 2024 ATB.

proporcionar información sobre las tendencias futuras en la economía de la producción de SAF y servir de base para la planificación de instalaciones y las decisiones de inversión.

Aunque los precios varían en LAC, se ha utilizado Brasil como punto de referencia en el análisis debido a la mayor disponibilidad de datos sobre los precios de las materias primas. Cuando se han encontrado datos específicos de cada país, se les ha dado prioridad, aunque se trata de casos limitados. Los datos sobre el costo de las materias primas de S&P Global Energy se han utilizado como fuente principal para los precios actuales del mercado, complementados con investigaciones independientes y supuestos sobre las materias primas para las que no se dispone de información comercial³⁴¹. Dado que este estudio se proyecta hasta 2050, se espera que los costos de algunas materias primas cambien. El ICF desarrolló escenarios para capturar estos cambios y analizar su impacto. Se asumieron los siguientes perfiles de precios para los diferentes grupos de materias primas:

- Se asume que los precios de las materias primas oleaginosas convertidas en SAF mediante el proceso HEFA, como el aceite de cocina usado, la grasa animal y la soya, aumenten durante el periodo previsto debido a la escasez global del producto y al aumento de la demanda de otros sectores.
- Se prevé que el precio del etanol de segunda generación producido a partir de residuos agrícolas y forestales, así como de gases residuales, disminuya a causa del ritmo de aprendizaje asociado a la producción de este etanol y al avance de la tecnología y los procesos.
- Se asume que el etanol producido a partir de la caña de azúcar y el maíz presenta un perfil de precios relativamente estable, por lo que se mantiene el nivel actual de precios.

5.7.4 Combustible físico y coproductos

5.7.4.1 Combustible de aviación

Actualmente, los SAF se comercializan a un precio superior al del combustible convencional para aviones³⁴². El combustible fósil es una materia prima con un mercado establecido y transparente, mientras que el mercado de SAF aún es incipiente, las transacciones son limitadas y la volatilidad de los precios es elevada. El precio del combustible fósil para aviones depende principalmente de la dinámica del mercado del petróleo crudo, los costos de refinado y la logística de distribución. Otro factor que influye en la economía futura del combustible convencional para aviones es la posible aplicación de impuestos sobre el carbono o gravámenes medioambientales similares. Estas medidas están diseñadas para internalizar los costos medioambientales asociados a la combustión de combustibles fósiles, lo que aumenta de forma efectiva el precio del combustible de aviación de las compañías aéreas. Esto podría afectar potencialmente a los patrones de transporte aéreo regional, especialmente en regiones muy sensibles a los precios, como LAC. Los efectos negativos sobre la demanda podrían incluir una reducción de la frecuencia de los vuelos, presión sobre la rentabilidad de las aerolíneas y una disminución de la conectividad regional, ya que las aerolíneas se verían obligadas a recortar rutas o limitar el servicio en respuesta al aumento de los costos operativos derivados de la fijación de precios del carbono (el combustible de aviación ya representa entre el 30 % y el 40 % de los costos operativos de las aerolíneas de la región).

Por el contrario, el precio de SAF refleja no solo el costo de producción impulsado por el precio de las materias primas, a menudo derivadas de fuentes renovables, la vía tecnológica y la eficiencia de los procesos de conversión (y la financiación de las instalaciones de producción asociadas), sino también el valor de los coproductos, los costos de mezcla y logística, los costos administrativos y, en algunos casos, una prima de mercado. Para comprender la prima «ecológica» de SAF y calcular con mayor precisión el costo de abatimiento vinculando el ahorro de carbono que se consigue al utilizar SAF en lugar de combustible convencional para aviones al precio subyacente, es importante disponer de una estimación de los precios actuales y futuros del combustible fósil para aviones.

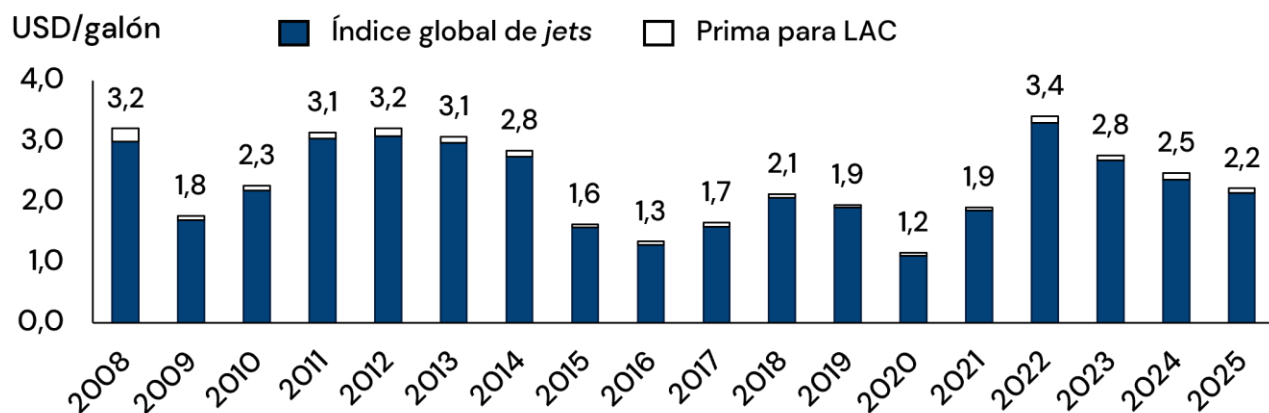
El combustible convencional para aviones en LAC se ha comercializado históricamente a un precio superior al precio medio global del queroseno³⁴³, impulsado probablemente por la producción nacional limitada y a la dependencia de las importaciones, como se analiza con más detalle en la sección 5.4.

³⁴¹ Los precios históricos y actuales (agosto de 2025) fueron proporcionados por S&P Global Energy para el aceite de cocina usado, la grasa animal, el aceite de soya y el etanol de caña de azúcar comercializados en Brasil, así como para el aceite de soya en Argentina.

³⁴² <https://www.airlines.org/dataset/saf-vs-fuel-jet-comparison/>

³⁴³ Basado en el análisis del índice global de *jets* de S&P Global Energy y el índice de *jets* de LAC.

En LAC, el combustible de aviación se ha comercializado históricamente a un precio superior al precio medio global



Fuente: S&P Global Energy, ©2025 by S&P Global Inc. Análisis de ICF.

El pronóstico del combustible de aviación utiliza como línea base la relación entre el petróleo crudo y el queroseno observada históricamente. Se realizó un análisis de correlación entre los precios medios anuales históricos (2002-2024) del petróleo Brent y el índice S&P Global Energy Platts Jet Index Latin America and the Caribbean^{344, 345}. La figura anterior muestra los precios históricos del índice de combustible de aviación en América Latina. Se encontró un valor R^2 de 0,96, lo que destaca una fuerte relación entre ambos. Se amplía aún más utilizando los precios pronosticados del petróleo crudo de la AIE que se resumen en la siguiente tabla³⁴⁶. Los valores se interpolan para obtener el precio medio anual asumido cada año. Al vincular estos precios al índice S&P Global Energy Latin American jet fuel utilizando la ecuación de correlación subyacente, se obtienen dos escenarios para el costo futuro del queroseno en la región (utilizando los escenarios de petróleo crudo STEPS y APS). Sin embargo, el escenario NZE se considera un caso relativamente extremo para el precio del petróleo, por lo que el precio correspondiente del combustible de aviación no se ha modelado en este estudio.

Tabla54: Pronóstico de la AIE del precio del petróleo crudo por escenario

Escenario de la AIE	Unidad	2023	2030	2040	2050
STEPS ³⁴⁷	USD/barril (USD/galón)	82 (1,91)	79 (1,88)	77 (1,83)	75 (1,78)
APS ³⁴⁸	USD/barril (USD/galón)	82 (1,91)	72 (1,71)	63 (1,50)	58 (1,38)
NZE ³⁴⁹	USD/barril (USD/galón)	82 (1,91)	42 (1,00)	30 (0,71)	25 (0,67)

³⁴⁴ Precios históricos del petróleo Brent - <https://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=PET&s=RBRT&f=M>

³⁴⁵ Proporcionado por S&P Global Energy a los efectos del presente análisis.

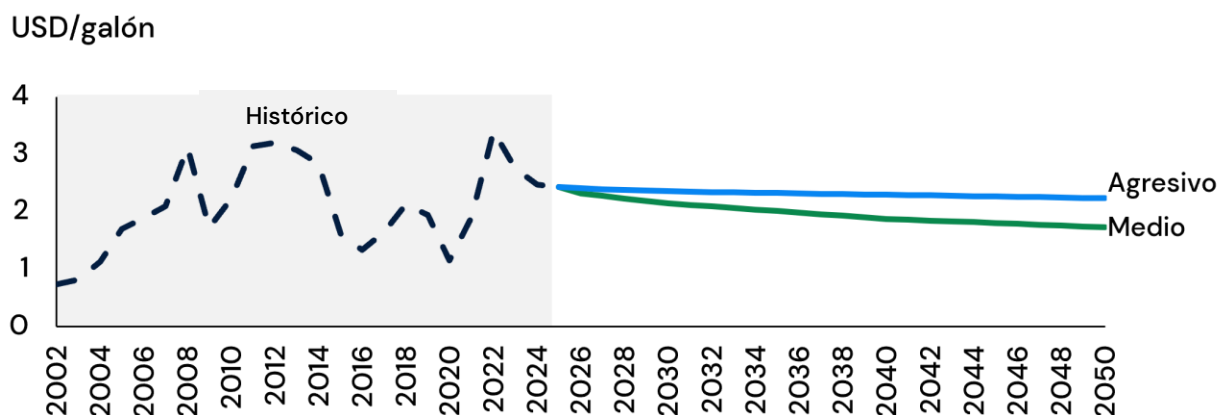
³⁴⁶ <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>

³⁴⁷ STEPS (*Stated Policies Scenario*) = Escenario de políticas declaradas; diseñado para proporcionar una idea de la dirección predominante de la progresión del sistema energético y el panorama político actual. El STEPS ofrece un punto de referencia más conservador para el futuro que el Escenario de Compromisos Anunciados (APS), al no dar por sentado que los gobiernos alcanzarán todos los objetivos anunciados - <https://www.iea.org/reports/global-energy-and-climate-model/stated-policies-scenario-steps>

³⁴⁸ APS (*Announced Pledges Scenario*) = Escenario de compromisos anunciados; ilustra en qué medida las ambiciones y los objetivos anunciados pueden lograr las reducciones de emisiones necesarias para alcanzar las emisiones netas cero en 2050 - <https://www.iea.org/reports/global-energy-and-climate-model/announced-pledges-scenario-aps>

³⁴⁹ NZE (Escenario de *Net Zero Emissions* para 2050) = Escenario de emisiones netas cero para 2050; el escenario de emisiones netas cero para 2050 (escenario NZE) es un escenario normativo que muestra una ruta para que el sector energético global alcance emisiones netas de CO₂ cero

Se construyeron dos escenarios para las perspectivas de precio del combustible para aviones en LAC



Fuente: incluye datos de S&P Global Energy, ©2025 by S&P Global Inc., IEA. análisis de ICF
 Supuestos: 1. Relación histórica (2002 a 2024) entre el precio Brent del petróleo y S&P Global Platts Jet Index Latin America & Caribbean usado (valor de R2 0.97, es decir, correlación alta); 2. Se suponen escenarios de precio del crudo IEA para representar el pronóstico del precio Brent; 3. El valor 2025 usado es una media observada hasta julio de 2025 con base en los datos de S&P Global Energy.

5.7.4.2 Coproductos

Los ingresos de la producción de otros combustibles, como el diésel renovable y la nafta, pueden tener un impacto significativo en el precio de SAF. Cuando estos subproductos se generan junto con SAF, pueden venderse en el mercado, lo que proporciona fuentes de ingresos adicionales. Estos ingresos complementarios contribuyen a reducir el costo total de la producción de SAF, lo que la hace más viable desde el punto de vista económico. El diésel renovable (RD), por ejemplo, tiene una gran demanda debido a su menor huella de carbono en comparación con el diésel tradicional, y la nafta es una materia prima muy valiosa en la industria petroquímica. Al aprovechar estos subproductos, los productores pueden reducir la carga financiera asociada a la producción de SAF, promoviendo así su adopción y uso. Los ingresos generados por dichos coproductos dependen de su precio de mercado, así como de los volúmenes producidos. Estos volúmenes dependen posteriormente de la vía tecnológica y las especificaciones de la instalación. Las diferentes gamas de productos podrían dar lugar a una cuota diferente de coproductos generados anualmente. Para efectos del presente análisis, se asume un rendimiento creciente de SAF, lo que refleja la hipótesis de unas condiciones económicas que favorecen la priorización de SAF frente a otros combustibles y de avances tecnológicos que permiten obtener mayores rendimientos de SAF. La siguiente tabla indica las gamas de productos asumidos en el modelo durante el plazo analizado.

Tabla55: Gamas de productos previstas ³⁵⁰

Tecnología	Unidad	2025			2035			2050		
		Jet	Diésel	Nafta	Jet	Diésel	Nafta	Jet	Diésel	Nafta
HEFA	%	53	40	7	60	32	8	70	20	10
AtJ	%	78	7	15	81	10	9	85	14	1

para 2050, con las economías avanzadas alcanzando emisiones netas cero antes que otras: <https://www.iea.org/reports/global-energy-and-climate-model/net-zero-emissions-by-2050-scenario-nze>

³⁵⁰ Supuesto de ICF.

Tecnología	Unidad	2025			2035			2050		
		Jet	Diésel	Nafta	Jet	Diésel	Nafta	Jet	Diésel	Nafta
FT	%	61	36	3	63	34	4	65	30	5
PtL	%	72	14	14	75	13	13	80	10	10

El análisis utiliza precios de mercado de 55,45 dólares por galón para el RD y 44,69 dólares por galón para la nafta renovable³⁵¹ para estimar los ingresos generados por dichos coproductos. Si bien estas cifras reflejan las condiciones actuales del mercado, el mercado de los combustibles renovables es volátil y los precios pueden variar con el tiempo. Las proyecciones de ICF se basan en el supuesto de que estos precios se mantendrán constantes durante todo el período de pronóstico, aunque los cambios en los mercados de coproductos podrían afectar a la prima «ecológica» de SAF. Estos precios se basan en el mercado europeo, ya que no se dispone de datos comparables para LAC. Para tener en cuenta las diferencias regionales en los costos, el análisis incluye un ajuste por gastos de transporte de 0,25 dólares por galón³⁵².

5.7.5 Supuestos de financiación del proyecto

La financiación de proyectos representa un elemento fundamental para el avance de las instalaciones de SAF. Dados los importantes requisitos de capital y la dinámica de la industria en sus primeras etapas, es fundamental comprender claramente estos mecanismos. A medida que la industria madura, se espera que factores como el desarrollo tecnológico, la eficiencia operacional y las economías de escala influyan en los riesgos y los costos, lo que podría mejorar el acceso a la financiación y reducir los gastos de fabricación. Las siguientes secciones exploran cómo estas estructuras de financiación y condiciones de mercado configuran el panorama de inversión para los proyectos de SAF y describen los supuestos utilizados en el análisis para LAC.

5.7.5.1 Estructura de capital

Debido a la naturaleza intensiva en capital de estos proyectos, así como a la evolución de las tecnologías y las condiciones del mercado, garantizar una estructura de financiación adecuada es una parte fundamental del desarrollo del proyecto. Un enfoque estándar es una combinación de deuda y capital. En la mayoría de los casos, la financiación mediante deuda constituye entre el 60 % y el 80 % del capital total necesario, aportado por prestamistas tales como bancos comerciales, instituciones financieras de desarrollo o inversionistas especializados en infraestructuras. El 20 % al 40 % restante suele cubrirse con aportaciones de capital de los patrocinadores del proyecto, fondos de capital privado o socios estratégicos. Las proporciones exactas pueden variar en función de las características específicas del proyecto, la confianza de los inversionistas y las negociaciones con las instituciones financieras.

En este estudio, se han utilizado relaciones deuda-capital del 70 %/30 %, 60 %/40 %, 55 %/45 % y 55 %/45 % para el proceso HEFA, AtJ, FT y PtL, respectivamente. Estas relaciones son representativas de los niveles de 2025 y se ha modelado un aumento gradual de la relación de deuda a lo largo del pronóstico para reflejar la reducción esperada del riesgo de las tecnologías SAF y el atractivo de una mayor financiación mediante deuda para las instalaciones construidas más adelante en el período.

5.7.5.2 Costo de la deuda y condiciones

Los proveedores de deuda exigen pagos habituales de intereses y amortizaciones del capital principal según una programación acordada. Los tipos de interés aplicados a la deuda del proyecto están fuertemente influenciados por la ubicación de este, lo que está estrechamente relacionado con el riesgo percibido de impago de la deuda. En regiones como Norteamérica y Europa Occidental, donde los mercados financieros son estables y los marcos de trabajo regulatorios para los combustibles renovables son maduros, el riesgo de impago es generalmente bajo, lo que lleva a los prestamistas a ofrecer tipos de interés más bajos. En los mercados emergentes con entornos regulatorios menos predecibles o con un mayor riesgo país, los prestamistas perciben una mayor probabilidad de impago debido a factores

³⁵¹ El precio del RD es el costo medio en el período (mayo de 2024 a julio de 2025), según los datos brutos proporcionados por S&P Global Energy a efectos de este análisis. Precio de la nafta renovable (agosto de 2025) según *Quantum Intelligence*.

³⁵² Supuesto de ICF.

como la inestabilidad monetaria, los cambios en los marcos de trabajo jurídicos o la experiencia limitada con proyectos SAF a gran escala. Para compensar, exigen tipos de interés más elevados.

LAC no cuenta actualmente con ningún mecanismo de financiación de SAF operativo (2025), algunas economías son inestables y los mercados son volátiles. Por lo tanto, se espera una tasa de interés más alta para la financiación SAF en la región. Las agencias de calificación crediticia, como S&P Global Ratings, analizan la situación de estabilidad crediticia en países de todo el mundo e indican qué regiones presentan un mayor porcentaje de impagos de deuda, lo que indica un mayor riesgo en dichas regiones. En la Tabla 56 (a continuación) se muestra un resumen de las últimas calificaciones crediticias por país en LAC. Para los países con calificaciones más bajas, se asume una tasa de interés más alta sobre la deuda.

Para elaborar los supuestos sobre los tipos de interés, ICF ha tomado como línea base un tipo básico del banco central que representa un indicador aproximado del objetivo bancario a largo plazo, con el fin de desvincular la situación económica actual, los tipos actuales y la inflación³⁵³. Por lo general, el tipo de interés de la deuda para un proyecto renovable, como la energía solar o SAF, es más alto que el tipo de interés del banco central debido a los riesgos asociados a este tipo de proyectos en sectores aún incipientes. En el análisis se ha asumido una prima del 2,5 % al 5 % sobre la tasa de línea base de cada país, en función de la calificación crediticia del país otorgada por S&P Global Ratings. El estudio asume una tasa constante a lo largo del plazo, ya que el análisis desacopla los tipos de interés y la inflación. Si bien los cambios en la política monetaria podrían provocar fluctuaciones en el interés de línea base durante un período de 25 años, dependiendo de si se aplica una política expansiva o restrictiva, separar estos efectos sobre la inflación optimiza el análisis. La relación entre los tipos de interés del banco central y el costo de la deuda de un proyecto ha quedado recientemente demostrada por el aumento del costo de los proyectos solares debido al incremento de los tipos de interés³⁵⁴. El modelo asume un término de deuda de 10 años.

5.7.5.3 Costo del capital

Además de la deuda, la financiación mediante capital desempeña un papel igualmente fundamental en la estructura de capital general de un proyecto SAF. El costo del capital representa el rendimiento que esperan los inversionistas a cambio de su inversión de capital, lo que refleja tanto el costo de oportunidad de invertir en otra parte como los riesgos específicos asociados al proyecto. A diferencia de los proveedores de deuda, los inversionistas de capital no reciben pagos fijos; en cambio, sus rendimientos dependen del desempeño y la rentabilidad del proyecto. Como resultado, se enfrentan a un mayor riesgo de perder su capital si el proyecto no alcanza los resultados esperados o fracasa.

Esta dinámica de riesgo-rentabilidad es especialmente relevante para las instalaciones que dependen de rutas emergentes o menos comprobadas, como AtJ, FT y PtL. Si bien ofrecen flexibilidad en cuanto a las materias primas y un potencial de ampliación, conllevan mayores riesgos técnicos y operativos que las rutas más maduras, como el proceso HEFA. El historial comercial de AtJ, FT y PtL es relativamente limitado, y los retos en materia de optimización de procesos y cumplimiento regulatorio pueden afectar a los plazos y los rendimientos. Para compensar, los accionistas exigen mayores rendimientos, lo que eleva el costo del capital.

Para reflejar estas diferencias, el análisis supone una tasa interna de retorno (TIR) inicial del 18 % para el proceso HEFA, del 20 % para AtJ y del 22 % para FT y PtL. Aunque hoy en día se exigen TIR más elevadas, este análisis asume que los volúmenes de SAF serán limitados hasta después de 2035, por lo que estos valores se han elegido para representar la situación en un momento en el que el sector ha comenzado a reducir el riesgo para ajustarse a esta línea de tiempo. Esto se ve acentuado por el hecho de que la metodología escalona el despliegue de los SAF, comenzando por vías más asequibles antes de pasar a enfoques más costosos, pero más sostenibles; esto da lugar a un mayor retraso en el despliegue de tecnologías de mayor riesgo, como FT y PtL. A medida que las tecnologías maduran y se implementan más instalaciones en la región, se asume que estas rutas se vuelvan menos riesgosas y que los costos de capital decrezcan levemente por debajo de estos puntos de inicio. Se ha modelado una reducción más agresiva a corto plazo para AtJ debido a que las instalaciones a escala industrial están empezando a comercializarse, mientras que se asume que la reducción para FT será más gradual³⁵⁵. El costo básico requerido del capital de línea base se ajusta además por

³⁵⁴ <https://sustainablefinance.ox.ac.uk/wp-content/uploads/2025/03/Executive-Summary-renewable-poser-Dec-2024.pdf>

³⁵⁵ <https://www.lanzajet.com/freedom-pines>

país para reflejar las condiciones económicas y el atractivo, basándose en las calificaciones crediticias de S&P Global Ratings para modelar los rendimientos requeridos más elevados para las ubicaciones más arriesgadas.

Un análisis minucioso y una estructuración transparente de estos supuestos de financiación del proyecto contribuyen a garantizar que tanto los inversionistas como los prestamistas tengan una visión común de los riesgos y los posibles rendimientos. De este modo, los proyectos están mejor posicionados para alcanzar el cierre financiero y funcionar con éxito durante su vida útil prevista.

Tabla56: Aportes financieros específicos por país (a septiembre de 2025)

País	Calificación de país de S&P Global Ratings ³⁵⁶	Prima de riesgo estimada sobre la tasa de deuda de línea base ³⁵⁷	Tasa del impuesto de corporativo ³⁵⁸
Argentina	CCC	5%	35%
Bahamas	B+	4%	-
Brasil	BB	3%	34%
Chile	A	2%	27%
Colombia	BB	3%	35%
República Dominicana	BB	3%	27%
Ecuador	B-	4%	25%
El Salvador	B-	4%	30%
México	BBB	2,5%	30%
Panamá	BBB-	2,5%	25%
Perú	BBB-	2,5%	30%

5.7.6 Costos posteriores

Si bien el precio de SAF se basa en los costos de producción y en los rendimientos requeridos, es fundamental reconocer que el precio final que pagan las aerolíneas incluye una serie de gastos posteriores, así como márgenes asociados a la dinámica del mercado. Los costos posteriores abarcan los gastos de mezcla, transporte, almacenamiento y administración. Todos estos influyen en el precio de entrega de SAF. Estos costos derivados son significativos, sobre todo si se tiene en cuenta que los gastos de combustible suelen representar entre el 30 % y el 40 % de los costos operativos totales de una aerolínea. Dado que los SAF suelen tener un costo base más elevado, estos gastos adicionales cobran cada vez más relevancia en el precio final de compra.

Si bien el costo de la mezcla se ha estimado en 0,01-0,02 dólares por galón de biocombustible en el Reino Unido, se espera que los costos sean más elevados en LAC, dada la infraestructura actual³⁵⁹. El transporte representa una parte más significativa de los gastos posteriores y varía mucho en función del tamaño del aeropuerto, la distancia a los centros de producción y la sofisticación de la cadena de suministro. En el caso de los aeropuertos más pequeños, urbanos o menos bien conectados, los costos de transporte son aún más elevados. Sin embargo, es poco probable que estas instalaciones reciban cantidades sustanciales de los SAF en un futuro previsible. Se espera que el costo del transporte con SAF sea comparable al del combustible convencional para aviones, ya que ambos dependen de la misma

³⁵⁶ <https://tradingeconomics.com/country-list/rating> ; <https://www.spglobal.com/ratings/sri/>

³⁵⁷ Supuesto de ICF.

³⁵⁸ <https://tradingeconomics.com/countries>

³⁵⁹ <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/66601969dc15efddd1a872d/uk-saf-mandate-final-stage-cost-benefit-analysis.pdf>

infraestructura. Un estudio realizado en Brasil en 2021 reveló que el costo del transporte de combustible de aviación a 400 km por carretera y barco era de 0,33 y 0,17 dólares por galón, respectivamente³⁶⁰. Sin embargo, con el tiempo, las inversiones focalizadas en infraestructura, como centros de mezcla centralizados y una mayor capacidad de almacenamiento, podrían reducir estos costos y mejorar la viabilidad económica de SAF en toda la región. Estas mejoras contribuirían a una cadena de suministro más eficiente y podrían mejorar la accesibilidad y la viabilidad económica de la adopción de SAF en diversos aeropuertos.

Más allá de los costos de producción y derivados, el precio de SAF varía en función del enfoque de adquisición y la metodología de fijación de precios elegida. Las compras a corto plazo o al contado suelen implicar primas más elevadas debido a la dinámica del mercado a corto plazo³⁶¹. Los acuerdos de compra a largo plazo permiten a los productores planificar sus operaciones durante un período prolongado y garantizar el suministro futuro, por lo que los márgenes suelen ser más reducidos en este tipo de acuerdos. En todos los tipos de contratación, el precio final está determinado por la estructura del acuerdo, las condiciones predominantes en el mercado y la asignación de los riesgos operativos y financieros.

En este estudio, el costo derivado de SAF en 2030 se estima en 0,95 dólares por galón. Se prevé que estos costos disminuyan de forma constante hasta 2045, estabilizándose en aproximadamente 0,50 dólares por galón. El desglose de los costos incluye el transporte, que es relativamente elevado dada la dependencia de la región del transporte por carretera, así como los gastos de mezcla y administrativos. El desarrollo previsto de las redes logísticas reducirá la prima.

³⁶⁰ <https://ptx-hub.org/wp-content/uploads/2021/07/Cost-Analysis-of-Aviation-Fuels-in-Brazil.pdf>

³⁶¹ https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/saf-procurement_12052024.pdf

El papel de *book and claim* en el suministro de SAF

En el panorama de SAF, el sistema *book-and-claim* ha surgido como un sistema de cadena de custodia diseñado para conciliar el desajuste geográfico entre los lugares donde los SAF pueden producirse de forma más eficiente y aquellos donde realmente se demandan. Al permitir que el suministro físico de SAF se concentre en *hubs* de producción óptimos (regiones con abundantes materias primas, electricidad baja en carbono o infraestructura favorable) y, al mismo tiempo, permitir transferencias «virtuales» de atributos medioambientales a compradores de cualquier parte del mundo, el sistema *book-and-claim* aumenta el alcance del mercado y acelera la reducción de emisiones incluso en lugares poco adecuados para la producción o distribución de los SAF.

Hoy en día existen sistemas de certificación y registro confiables que pueden minimizar el riesgo de reclamaciones duplicadas. Sin embargo, siguen existiendo preocupaciones en materia de regulación. La gobernanza y la supervisión operativa de los registros siguen evolucionando, y los responsables de las políticas se enfrentan a las implicaciones de separar el suministro físico de combustible de los beneficios medioambientales asociados. Esta separación plantea interrogantes sobre cómo tratar los cobeneficios, tales como las mejoras en la calidad del aire local, los incentivos fiscales u otras ventajas vinculadas a las políticas que pueden o no ser acumulables para los proveedores o los usuarios finales. También destaca la distribución potencialmente desigual del empleo, el desarrollo tecnológico y la creación de valor económico, que tienden a concentrarse en torno a los *hubs* de producción, en lugar de en los lugares donde finalmente se reclaman los atributos medioambientales y, por lo tanto, donde se soporta el costo adicional.

Desde el punto de vista económico, el sistema *book-and-claim* mejora sin duda la competencia al ampliar el tamaño efectivo del mercado y reducir los costos de suministro. Sin embargo, esta misma dinámica puede crear barreras para los nuevos participantes, especialmente aquellos que desarrollan tecnologías de SAF en fase inicial o de mayor riesgo. Por ejemplo, un país con abundante agua limpia, frecuentes restricciones de vertido de energía renovable y una red eléctrica con bajas emisiones de carbono podría producir e-SAF altamente competitivos siguiendo un modelo de *book-and-claim*. Si bien esto trae beneficios a los compradores y es eficiente desde el punto de vista del comercio abierto, puede suponer una desventaja para las regiones que aún se encuentran en transición hacia redes más limpias, lo que podría afectar a la seguridad energética y ralentizar la diversificación de las vías de suministro. El riesgo de *dumping* en el mercado también cobra mayor relevancia en un sistema en el que las limitaciones físicas del transporte ya no restringen la competencia.

Desde el punto de vista logístico, el sistema *book-and-claim* suele ser compatible con las cadenas de suministro de combustible convencional existentes, lo que ayuda a mantener los costos relativamente bajos. Sin embargo, los costos administrativos y técnicos que conlleva la creación y el mantenimiento de registros sólidos pueden contrarrestar estos ahorros logísticos. Además, cuando los marcos regulatorios como CORSIA no vinculan la reclamación medioambiental con la ubicación física de abastecimiento, el valor añadido de *book-and-claim* disminuye. El sistema *book-and-claim* resulta especialmente ventajoso solo en los casos en los que la ubicación del abastecimiento es muy relevante, pero son precisamente esos los casos en los que su implementación se vuelve más compleja.

En general, el sistema *book-and-claim* es un habilitador potente del crecimiento del mercado de SAF y de la reducción de costos, pero su diseño y gobernanza requieren una atención especial para garantizar la equidad, la integridad y la sostenibilidad a largo plazo en todo el sector de la aviación global.

5.7.7 Costo de abatimiento

Para calcular el costo de abatimiento de cada materia prima, el primer paso fue determinar los valores de emisiones del ciclo de vida. Se utilizaron los valores predeterminados de emisiones del ciclo de vida del

CORSIA para 2025, incluido el ILUC, como fuente principal en caso de que estuvieran disponibles³⁶². En el caso de las materias primas con valores separados para instalaciones independientes e integradas, el valor integrado se asumió con base a las realidades regionales. Cuando se disponía de valores específicos de Brasil, se les dio prioridad sobre las medias globales. Para el FT-MSW, se aplicó el factor de emisiones del ciclo de vida en función del contenido no biogénico utilizando los valores de la OACI³⁶³. Dado que CORSIA no incluye valores para el PtL, se utilizaron en su lugar los datos del Foro Económico global³⁶⁴.

Entre 2025 y 2050, se espera que la intensidad de carbono de SAF disminuya por varias razones. En todas las rutas de producción, se asume una reducción del 50 % en las emisiones derivadas de la producción de combustible, debido a la reducción de la intensidad de carbono del insumo energético. Se prevé que los valores ILUC disminuyan entre un 25 % y un 50 % gracias a las mejoras en las prácticas agrícolas. Se espera que el contenido biogénico de los RSU aumente a medida que avancen las tecnologías de clasificación. Además, se prevé que los procesos PtL consuman menos energía a medida que mejore la eficiencia. Los valores utilizados para 2025 y 2050, incluidos los supuestos sobre el ILUC, se presentan en la siguiente tabla.

A continuación, se calculó la reducción de la intensidad de carbono en relación con el combustible fósil para aviones comparando el valor de las emisiones del ciclo de vida de cada materia prima con la línea base del CORSIA de 89 gCO₂e/MJ. Esta reducción se convirtió en emisiones evitadas por tonelada de combustible utilizando un factor *well-to-wake* de 3,81. Para cada año y combinación de materia prima y tecnología, la diferencia entre el precio calculado de SAF y el precio del combustible fósil para aviones, expresada por tonelada de combustible, se dividió por la cantidad asociada de emisiones evitadas. El costo de abatimiento resultante se expresa en dólares por tonelada de CO₂ evitada.

Tabla57: Emisiones durante el ciclo de vida por la combinación de tecnología y materia prima

Tecnología	Materia prima	Valor del LCA 2025 (gCO ₂ e/MJ)	Costo de abatimiento en 2025 (USD/CO ₂ e)	Valor del LCA 2050 (gCO ₂ e/MJ)	Costo de reducción en 2050 (USD/CO ₂ e)
HEFA	UCO	13,9	480	9,3	565
HEFA	Grasa animal	29,7	630	19,8	661
HEFA	Aceite de soya	61,1	1.175	44,4	941
HEFA	Aceite de palma	76,5 ³⁶⁵	2.075	55,6	949
AtJ	Desechos agrícolas	24,6	1.122	15,0	560
AtJ	Residuos forestales	24,9	1.020	15,2	500
AtJ	Gases de desechos	29,4	835	23,8	469
AtJ	Etanol de caña de azúcar	32,8	704	17,2	417

³⁶² <https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Eligible%20Fuels/ICAO-document-06-Default-Life-Cycle-Emissions-June-2025.pdf>

³⁶³ <https://www.icao.int/environmental-protection/saf-rule-of-thumb>

³⁶⁴ https://www3.weforum.org/docs/WEF_FMC_SAF85_Technical_Brief_2024.pdf

³⁶⁵ Se asume que el biogás se captura y se oxida.

Tecnología	Materia prima	Valor del LCA 2025 (gCO ₂ e/MJ)	Costo de abatimiento en 2025 (USD/CO ₂ e)	Valor del LCA 2050 (gCO ₂ e/MJ)	Costo de reducción en 2050 (USD/CO ₂ e)
AtJ	Etanol de maíz	63,4	1.567	33,2	546
FT	RSU	39,3	2.694	25,7	955
PtL	CO ₂	10,0	1.947	5,7	874

5.7.8 Precios calculados del SAF y resultados del costo de abatimiento

En esta sección se presentan los resultados del precio calculado del SAF, previsto hasta 2050. Al tratarse de un sector incipiente, los precios evolucionarán con el escalonamiento de la tecnología, la maduración de la cadena de suministro, los cambios en las condiciones del mercado y el aumento de la demanda, y variarán según la ruta de producción. Las trayectorias futuras de los precios estarán impulsadas por la madurez y el aprendizaje tecnológicos, la disponibilidad y el precio de las materias primas, los gastos de capital, la eficiencia operativa y los factores del mercado, que en conjunto determinarán la viabilidad y la competitividad de cada ruta.

Estas estimaciones de precios del SAF se combinan con un análisis de la intensidad de carbono para obtener el costo de abatimiento de las diferentes combinaciones de materias primas y tecnologías. La vinculación del análisis de disponibilidad y potencial del SAF con los costos de reducción permitirá realizar una proyección del ahorro potencial de CO₂ gracias al SAF en los diferentes países de LAC, así como de los costos asociados en las siguientes fases del estudio. En esta sección también se presenta un análisis sobre lo que esto significa para el precio del SAF, así como la sensibilidad.

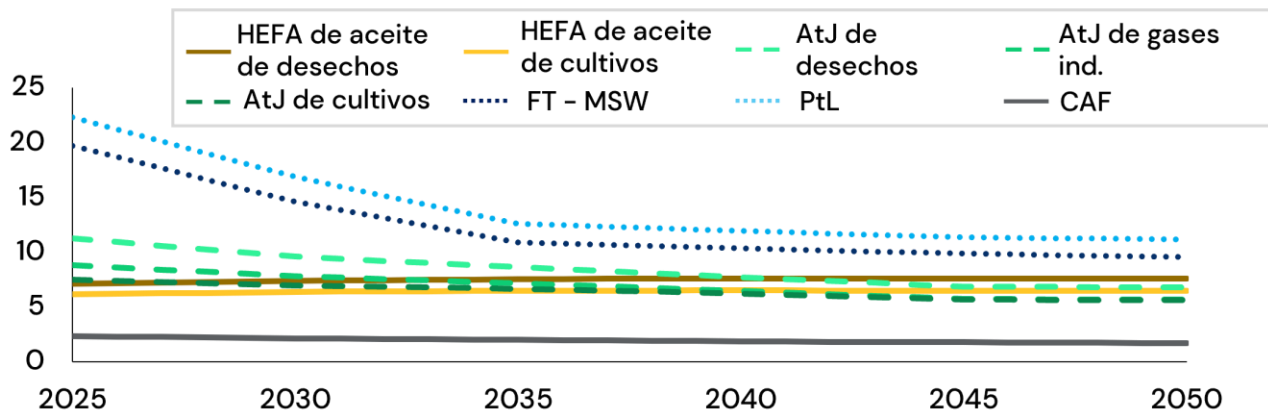
5.7.8.1 Resumen de resultados

La evolución prevista del precio del SAF y los costos de abatimiento en las distintas rutas de LAC se presenta en las dos siguientes figuras³⁶⁶. Los resultados se presentan como medias agregadas, con análisis detallados a nivel de país y de materia prima realizados en segundo plano, y tienen por objeto ofrecer una visión indicativa de las condiciones y del potencial regionales. En las siguientes subsecciones se ofrece una visión general de la situación actual y las perspectivas de cada una de las cuatro tecnologías.

³⁶⁶ El precio incluye los costos de producción y los costos derivados; los valores de emisiones durante el ciclo de vida se basan en <https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Eligible%20Fuels/ICAO-document-06-Default-Life-Cycle-Emissions-June-2025.pdf>, <https://www.icao.int/environmental-protection/saf-rule-of-thumb> y https://www3.weforum.org/docs/WEF_FMC_SAF85_Technical_Brief_2024.pdf

Se proyecta que el precio de SAF disminuya en la mayoría de las rutas a causa de la madurez tecnológica, mientras que el precio del proceso HEFA aumenta a causa de las dinámicas de comercialización de materias primas

Precio de SAF (USD/galón)

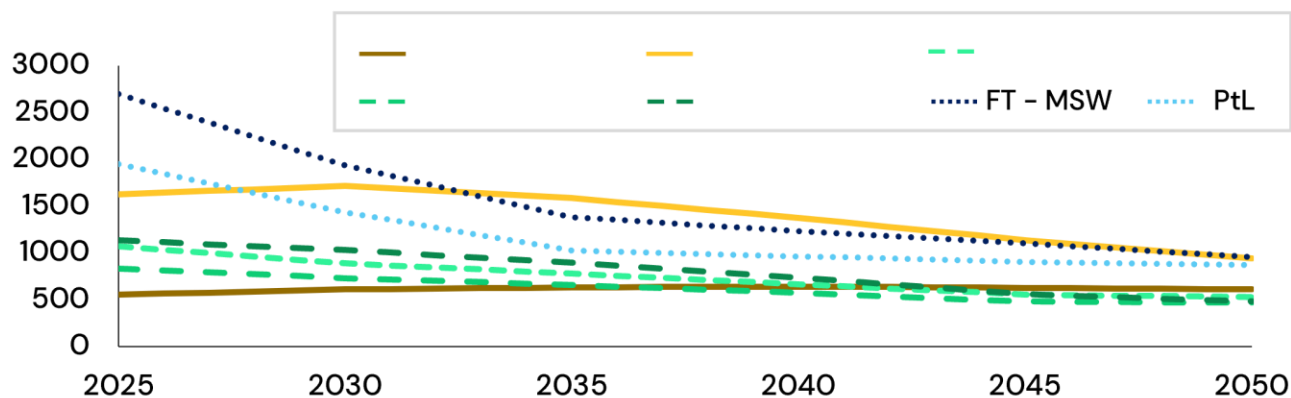


Fuente: análisis de ICF.

Nota: HEFA de aceite de cultivos = aceite de soya y aceite de palma, HEFA de aceites usados = aceite de cocina usado y grasa animal, AtJ de cultivos = caña de azúcar y etanol de maíz, AtJ de desechos = residuos de agricultura y silvicultura. CAF = combustible convencional de aviación.

Se proyecta que el costo de reducción disminuya en la mayoría de las rutas debido a la intensidad de las mejoras de carbono y a la madurez tecnológica

Costo de reducción por tecnología (USD/tCO_{2e})



Fuente: análisis de ICF.

Nota: HEFA de aceite de cultivos = aceite de soya y aceite de palma, HEFA de aceites usados = aceite de cocina usado y grasa animal, AtJ de cultivos = caña de azúcar y etanol de maíz, AtJ de desechos = residuos de agricultura y silvicultura.

5.7.8.2 HEFA

Estado actual: Actualmente, el proceso HEFA es la ruta más viable económicamente en términos de MSP, principalmente debido a su avanzada madurez tecnológica. Esta madurez se traduce en menores requisitos de inversión de capital y primas de riesgo reducidas, ya que la tecnología ha demostrado un desempeño confiable a escala comercial. Sin embargo, la disponibilidad de materia prima en LAC es relativamente limitada, especialmente después de ajustar el suministro teórico para reflejar lo que el sector de la aviación puede acceder de manera realista (véase la sección 5.6).

Estas limitaciones destacan la importancia de tener en cuenta tanto la madurez tecnológica como la accesibilidad de las materias primas a la hora de evaluar las opciones de SAF en la región.

Perspectivas: Se espera que el gasto de capital para las instalaciones del proceso HEFA disminuya solo alrededor de un 4 % entre 2025 y 2050, a medida que la madurez de la tecnología limite reducciones adicionales. Es probable que esta modesta mejora se vea contrarrestada por el aumento de los costos de las materias primas debido a la oferta limitada. En consecuencia, se prevé que los precios totales calculados experimenten una ligera tendencia al alza, de aproximadamente un 5 % para las materias primas de aceite vegetal y un 7 % para las materias primas de aceite usado durante el mismo período. Dada la gran cuota que representan los costos de las materias primas en el costo total de producción, la economía del proceso HEFA es muy sensible a las condiciones del mercado.

Sostenibilidad: El costo del abatimiento varía significativamente según la materia prima. En 2025, los SAF basados en el proceso HEFA SAF de UCO tienen el menor costo de abatimiento entre todas las combinaciones de tecnología y materia prima evaluadas, con aproximadamente 480 \$/tCO₂, seguido de las grasas animales, con 630 \$/tCO₂. Esto refleja tanto los precios más bajos en comparación con otros tipos de SAF como las elevadas reducciones de emisiones a lo largo del ciclo de vida en relación con el combustible fósil para aviones. Por el contrario, los SAF basados en el proceso HEFA a partir de la soya y el aceite de palma tienen un costo de abatimiento más del doble que el del UCO y las grasas animales, debido en parte a las emisiones derivadas del ILUC asociadas a dichas materias primas. Con el tiempo, se espera que los costos de abatimiento de los SAF basados en el proceso HEFA aumenten a medida que suban los precios de las materias primas y bajen los precios de los combustibles fósiles para aviones.

5.7.8.3 AtJ

Estado actual: Los SAF basados en ATJ tienen actualmente el segundo precio calculado más bajo entre las tecnologías evaluadas. Su intensidad de capital es mayor que la del proceso HEFA, con una inversión inicial por galón de combustible aproximadamente el doble que la del proceso HEFA. Sin embargo, se espera que esta brecha se reduzca a medida que las instalaciones se beneficien de las economías de escala, las mejoras tecnológicas y la eficiencia operativa. El análisis de la disponibilidad de materias primas indica que los residuos agrícolas y forestales ofrecen un potencial considerable para la producción de SAF en LAC, mientras que los gases industriales representan otra fuente prometedora (sección 5.6). No obstante, en 2025, el precio estimado de los SAF de AtJ derivado de cultivos será aproximadamente un 50 % inferior al de los SAF de AtJ basado en residuos.

Perspectivas: Se espera que el AtJ experimente reducciones de costos de capital más pronunciadas que el proceso HEFA, con una disminución prevista de los requisitos de CAPEX de alrededor del 40 % entre 2025 y 2050. Esto está impulsado por las mejoras tecnológicas y al despliegue global asumido, que reducen el riesgo de inversión y los costos asociados. Con el tiempo, se prevé que el precio estimado de SAF a partir del etanol derivado de desechos converja hacia el del etanol derivado de cultivos, debido en gran medida a las mejoras en las tecnologías de procesamiento, la eficiencia de la cadena de suministro y la disponibilidad de materias primas.

Sostenibilidad: Los costos de abatimiento de los SAF de AtJ dependen en gran medida de la elección de la materia prima. En 2025, el etanol de caña de azúcar ofrece el menor costo de abatimiento entre las materias primas AtJ, con alrededor de 704 \$/tCO₂, mejorando hasta aproximadamente 417 \$/tCO₂ en 2050, el más bajo entre todas las combinaciones de materias primas y tecnologías evaluadas. Es probable que los residuos agrícolas y forestales desempeñen un papel clave, con una reducción de los costos de abatimiento de alrededor del 51 % entre 2025 y 2050, hasta alcanzar los 530 dólares/tCO₂.

5.7.8.4 Gasificación FT

Estado actual: La producción de SAF mediante FT de los RSU es actualmente la ruta que requiere mayor inversión de capital, con un CAPEX por galón de combustible aproximadamente 17 veces superior al del proceso HEFA. Esto refleja la complejidad y la magnitud de la infraestructura necesaria, que incluye sistemas avanzados de reactores, unidades de tratamiento de gas y procesos de integración. Las implementaciones actuales se limitan en gran medida a escala piloto, con un alto grado de incertidumbre tecnológica y riesgos operativos. A pesar de estos retos, el FT de los RSU es prometedor para LAC, ya que los RSU tienen pocos usos competitivos y están disponibles a gran escala.

Perspectivas: Se prevé que el FT de los RSU alcance el mayor costo de producción y, por consiguiente, la mayor disminución de precios entre todas las rutas. A corto plazo, se espera que los precios bajen de 19,71 dólares por galón

en 2025 a 14,60 dólares por galón en 2030 y a 10,90 dólares por galón en 2035. Estas reducciones están impulsadas por los avances en el diseño de reactores, los sistemas de tratamiento de gases y la integración de procesos, así como a las economías de escala, una mayor adopción por parte del mercado y la reducción de los riesgos tecnológicos.

Sostenibilidad: Las emisiones del ciclo de vida del FT de los RSU dependen del contenido biogénico de los residuos. Con un contenido biogénico del 100 %, las emisiones durante el ciclo de vida se reducen en aproximadamente un 94 % en comparación con el combustible fósil para aviones, mientras que con un contenido biogénico del 0 %, las emisiones aumentan en aproximadamente un 92 %. Para este análisis, se aplicó un valor inicial de CI de 39,3 gCO₂/MJ, lo que dio como resultado un costo de abatimiento de aproximadamente 2694 dólares por tCO₂ en 2025. Aunque este porcentaje es elevado en comparación con otras rutas, se espera que los costos de abatimiento de FT disminuyan más que cualquier otra ruta con el tiempo, aunque seguirán siendo más elevados que los del AtJ y PtL basados en residuos.

5.7.8.5 PtL

Estado actual: Actualmente, el PtL presenta el precio teórico estimado más alto entre las rutas evaluadas, con aproximadamente 22,30 dólares por galón en 2025. Los costos están impulsados principalmente por los gastos de capital y los gastos operativos variables, en particular el costo de la electricidad renovable para la producción de hidrógeno. Sin embargo, las instalaciones de PtL tienen un CAPEX y un OPEX fijo más bajos que las plantas FT, ya que evitan la gasificación y la limpieza del gas de síntesis, lo que permite un despliegue más modular. La disponibilidad de abundantes recursos renovables en LAC respalda el potencial a largo plazo de PtL.

Perspectivas: Los precios de SAF basados en PtL son muy sensibles a los precios de la electricidad renovable, que se espera que disminuyan significativamente a medida que la energía eólica y la energía solar fotovoltaica sigan creciendo. También se prevé que los costos de los electrolizadores disminuyan y, junto con las mejoras en el diseño de las plantas y la eficiencia de los procesos, se espera que estos cambios refuercen la competitividad del PtL. Se prevé que los precios calculados bajen de 22,30 dólares por galón en 2025 a 16,87 dólares en 2030 y 11,16 dólares en 2035. A pesar de estas mejoras, no se espera que el precio de los SAF de PtL caiga por debajo de ninguna de las otras combinaciones de materias primas y tecnologías evaluadas en este estudio entre 2025 y 2050.

Sostenibilidad: El PtL ofrece el mayor potencial de reducción de emisiones entre las rutas evaluadas cuando se alimenta con electricidad renovable adicional y se combina con la DAC o fuentes sostenibles de CO₂ biogénico. En 2025, el costo de la abatimiento es de aproximadamente 1947 \$/tCO₂, lo que es inferior al FT de los RSU, pero superior al del proceso HEFA y del AtJ. Para 2035, se prevé que el costo de abatimiento del PtL disminuya hasta los 1027 \$/tCO₂, y hasta los 874 \$/tCO₂ en 2050.

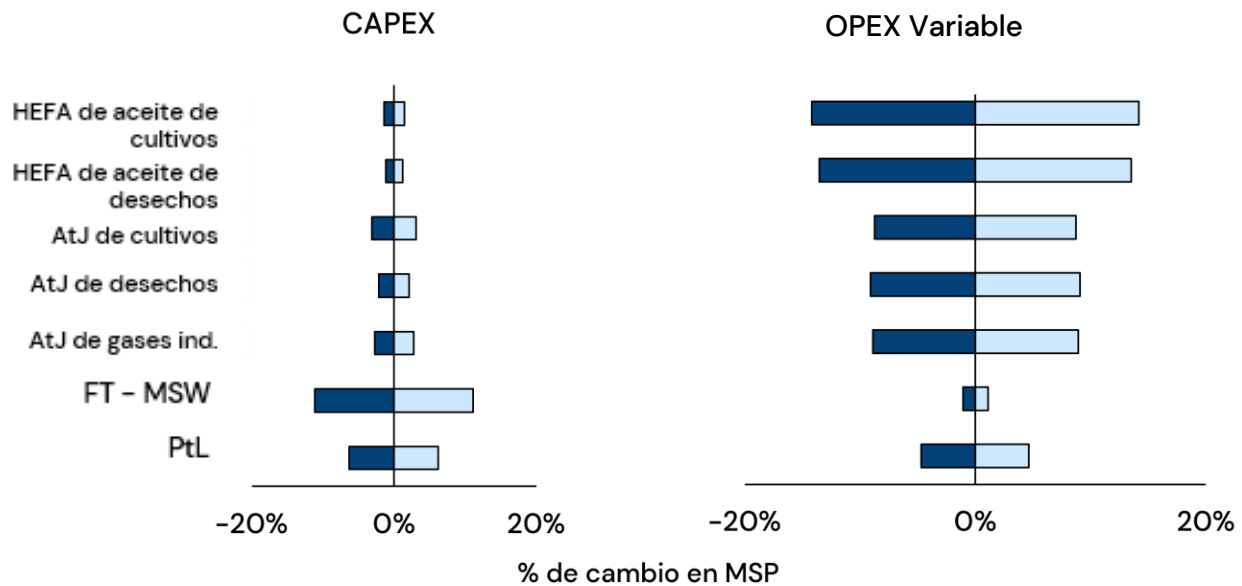
5.7.8.6 Sensibilidad a los precios e incertidumbres

Se realizó un análisis de sensibilidad de ±10 % para cada ruta de producción de SAF con el fin de evaluar cómo los cambios en los principales factores de costo influyen en los precios estimados para 2030 y 2050. El análisis consideró cinco variables: CAPEX, OPEX variable, tipos de interés de la deuda, TIR y tipo impositivo corporativo. Estas sensibilidades destacan qué rutas están más expuestas a la volatilidad de los costos y en qué ámbitos las incertidumbres podrían afectar significativamente a los precios futuros de los SAF para la aviación.

Los resultados muestran que la incertidumbre del CAPEX tiene el mayor impacto en las rutas intensivas en capital, como FT y PtL. Un aumento del 10 % en el CAPEX eleva el MSP calculado por FT en aproximadamente un 11,1 % en 2030 y un 11,4 % en 2050, mientras que el PtL estima un aumento de precios del 6,2 % y el 4,9 % durante los mismos periodos. Por el contrario, el proceso HEFA es mucho menos sensible, con cambios de solo 1,2-1,3 % en 2030 y 0,9-1,0 % en 2050, ya que su economía está dominada por las materias primas en lugar de la inversión de capital. Estos resultados indican que FT y PtL están muy expuestos a incertidumbres en cuanto a los costos de construcción, las limitaciones de la cadena de suministro y las tasas de aprendizaje tecnológico. El aprendizaje acelerado mediante una rápida implementación y el apoyo normativo podría reducir el CAPEX más rápido de lo esperado, lo que reduciría significativamente los costos y los precios de mercado para 2050. Por el contrario, una implementación más lenta o cuellos de botella persistentes podrían mantener los precios elevados.

Como se muestra en la siguiente figura, las rutas menos sensibles al CAPEX tienden a ser más sensibles a la incertidumbre variable del OPEX. Para el proceso HEFA, un aumento del 10 % en los gastos operativos variables conlleva un incremento del 13,5-13,8 % en el MSP en 2030 y del 12,1-12,2 % en 2050, lo que muestra su fuerte dependencia de los precios de las materias primas. AtJ muestra una exposición similar, con variaciones del 8,7 % al 9,1 % en 2030 y del 9,9 % en 2050. El PtL es moderadamente sensible, con cambios del 4,7 % y el 6,3 % en 2030 y 2050, respectivamente, debido a los costos de la electricidad renovable para la producción de hidrógeno. FT muestra una variación inferior al 2 %, lo que refuerza la idea de que su economía está dominada por el capital y no por los insumos operativos.

Sensibilidad a un cambio del 10% en CAPEX / OPEX variable para una instalación que inicia construcción en 2030



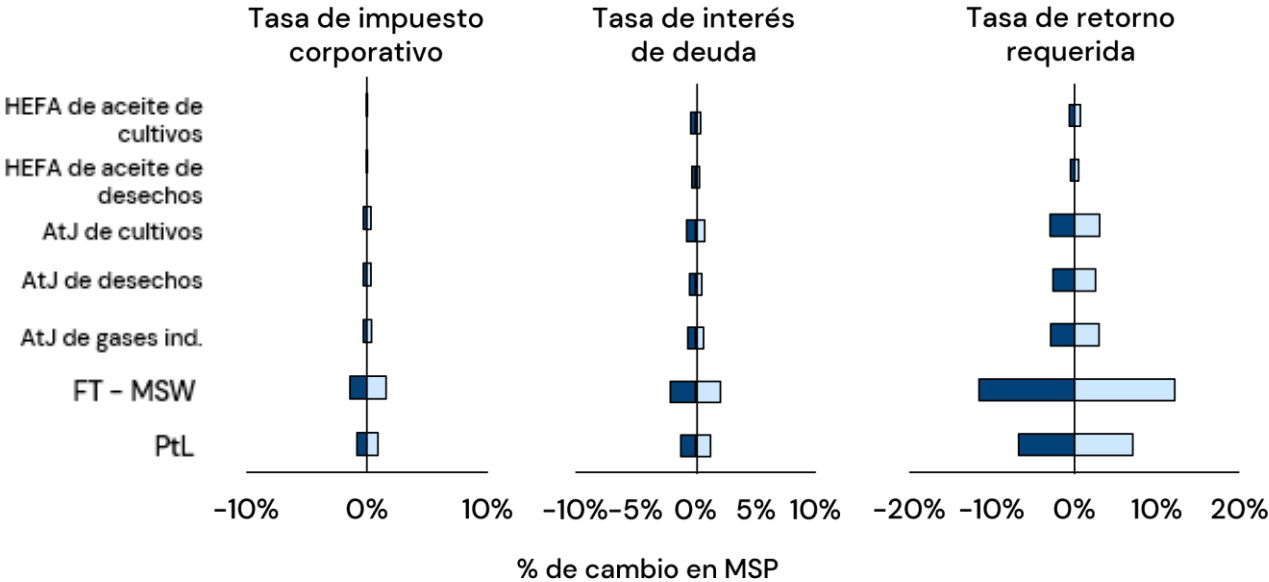
Fuente: análisis de ICF.

Nota: CAPEX = gastos de capital, OPEX = gastos operativos, MSP = precio mínimo de venta.

Nota: HEFA de aceite de cultivos = aceite de soya y aceite de palma, HEFA de aceites usados = aceite de cocina usado y grasa animal, AtJ de cultivos = caña de azúcar y etanol de maíz, AtJ de desechos = residuos de agricultura y silvicultura.

Los supuestos financieros introducen otro nivel de incertidumbre. Como se observa en la siguiente figura, FT y PtL son más sensibles a los cambios en las tasas de impuestos, los tipos de interés de la deuda y la rentabilidad exigida sobre el capital, ya que sus estructuras de costos están dominadas por la financiación. Las tasas impositivas más altas reducen los flujos de efectivo después de impuestos, mientras que los aumentos en las tasas de interés de la deuda elevan directamente los costos de los préstamos. El factor financiero más significativo es la rentabilidad exigida por los inversionistas sobre el capital propio. En el caso de FT y PtL, donde tanto la intensidad de capital como el riesgo percibido son elevados, el capital social representa una parte sustancial de los costos totales y está sujeto a expectativas de rendimiento de línea base más elevadas. Como resultado, incluso un pequeño cambio en el rendimiento requerido a lo largo de la vida útil del proyecto produce un aumento desproporcionado en el precio calculado en comparación con los cambios en los impuestos o las tasas de interés, que solo influyen en partes específicas del flujo de caja.

Sensibilidad a un cambio del 10% en las variables financieras para una instalación que inicia construcción en 2030



Fuente: análisis de ICF.

Nota: CAPEX = gastos de capital, OPEX = gastos operativos, MSP = precio mínimo de venta.

Nota: HEFA de aceite de cultivos = aceite de soya y aceite de palma, HEFA de aceites usados = aceite de cocina usado y grasa animal, AtJ de cultivos = caña de azúcar y etanol de maíz, AtJ de desechos = residuos de agricultura y silvicultura.

5.7.9 Conclusiones

En esta sección se ha evaluado la situación actual y el potencial futuro de los SAF en LAC, y han destacado tanto las oportunidades como las limitaciones en materia de políticas, disponibilidad de materias primas, rutas tecnológicas y viabilidad económica.

El análisis destaca que los SAF representan una medida clave dentro del sector para descarbonizar la aviación, con compatibilidad inmediata y potencial de reducción de emisiones a largo plazo. **Sin embargo, su implementación en LAC se enfrenta a varios retos, entre ellos la disponibilidad limitada de materias primas sostenibles para las tecnologías actualmente maduras (por ejemplo, el proceso HEFA, que depende del UCO), los elevados costos de producción y los consiguientes precios, las diferencias en las infraestructuras y las preocupaciones en materia de sostenibilidad.** Estas barreras se ven agravadas por la naturaleza incipiente de los marcos de trabajo regulatorios y la ausencia de instalaciones de producción de SAF a escala comercial en la región.

El análisis de las materias primas indica que los residuos y desechos, incluidos los residuos agrícolas, los residuos sólidos urbanos y los residuos forestales, constituyen los recursos más abundantes en toda la región, siendo Brasil, Argentina y México los países con mayor potencial. Los aceites derivados de cultivos, como el de soya y el de palma, se ven actualmente limitados debido a usos competitivos y a preocupaciones relacionadas con la sostenibilidad.

Las evaluaciones tecnológicas muestran que el proceso HEFA es actualmente la ruta más rentable, aunque su escalabilidad está limitada por las restricciones de las materias primas. Las rutas del AtJ y PtL ofrecen perspectivas prometedoras a largo plazo, especialmente a medida que se aumenta la capacidad de electricidad renovable y maduran las tecnologías de etanol de segunda generación. El coprocesamiento puede ser una solución temporal, pero su contribución a la descarbonización profunda está limitada por las proporciones de mezcla y las complejidades de la contabilidad de las emisiones durante el ciclo de vida.

Los modelos tecnoeconómicos sugieren que los precios calculados para los SAF se mantendrán por encima de los precios del combustible convencional para aviones hasta 2050 (entre 3 y 12 veces más altos, dependiendo de la materia prima y la tecnología utilizadas), con costos de abatimiento que varían significativamente según la materia prima y la tecnología. Las rutas basadas en desechos, como el AtJ de gases industriales y FT de los RSU, muestran un potencial de reducción de costos a lo largo del tiempo, aunque actualmente se enfrentan a una alta intensidad de capital y a riesgos operativos.

Las inversiones destinadas a mejorar las infraestructuras y desarrollar cadenas de suministro más sólidas podrían contribuir a resolver las ineficiencias regionales y reducir los costos logísticos asociados al transporte de combustible a los aeropuertos.

El desarrollo de SAF está avanzando en toda la región, y varios países han puesto en marcha hojas de ruta, estudios de viabilidad y mecanismos de financiación para SAF. Sin embargo, la mayoría de los marcos de trabajo se encuentran aún en una fase inicial, y la armonización con estándares internacionales, como el CORSIA, será esencial para respaldar el acceso al mercado y la verificación de la sostenibilidad.

En resumen, LAC cuenta con los elementos fundamentales para apoyar el desarrollo de SAF, pero para hacer realidad este potencial será necesario:

- **Fortalecer los marcos de trabajo de datos y sostenibilidad** es esencial para garantizar la coherencia de las normas de monitoreo, verificación y presentación de estándares en toda la región. Se requiere la participación del gobierno para establecer políticas sólidas, asignar recursos y facilitar la colaboración entre los grupos de interés, lo que permite implementar y mantener sistemas eficaces de datos y sostenibilidad.
- **Movilizar inversiones focalizadas e incentivos económicos en toda la cadena de valor de la aviación** es esencial para desbloquear el potencial de reducción de emisiones de SAF en LAC. Mediante el despliegue estratégico de recursos financieros y la creación de incentivos económicos sólidos, los gobiernos pueden facilitar el desarrollo de infraestructuras, apoyar la expansión de las cadenas de suministro desde la producción de materias primas hasta la distribución de combustible y limitar la diferencia de precio con respecto al combustible convencional.
- **Lograr una evolución continua de las políticas y alineación con estándares internacionales.** Es necesario armonizar las políticas con los estándares internacionales para evitar la fragmentación de los enfoques regulatorios y los criterios de sostenibilidad en toda LAC. Si se alinean los marcos de trabajo nacionales con puntos de referencia internacionales como el CORSIA, los países pueden facilitar el comercio transfronterizo

de combustibles sostenibles para la aviación, optimizar los procesos de certificación y garantizar una verificación coherente de la sostenibilidad.

- **Lograr la priorización estratégica de materias primas con bajo riesgo de sostenibilidad y alta disponibilidad.** Al centrarse en estas materias primas, los países pueden minimizar los riesgos medioambientales y sociales, al tiempo que maximizan el potencial para una producción confiable de SAF. Este enfoque también facilita el cumplimiento de los estándares internacionales de sostenibilidad y favorece la escalabilidad a largo plazo, ya que este tipo de materias primas son menos propensas a enfrentarse a futuras restricciones regulatorias o de mercado.

Las conclusiones de este informe proporcionan una base para la toma de decisiones informadas y destacan áreas que deben explorarse más a fondo, como el papel de las materias primas emergentes, la integración de SAF en estrategias energéticas y climáticas más amplias, y el potencial de las exportaciones de los SAF y sus atributos medioambientales.

An aerial photograph showing a river winding through a vast, dense forest. The river is a light blue color, contrasting with the deep green of the surrounding trees. The forest appears to be a tropical or subtropical rainforest, with a thick canopy of various shades of green. The river flows from the top center towards the bottom center of the frame, with several bends and curves. The overall scene is a lush, natural landscape.

6 Oportunidades para compensaciones y eliminaciones en LAC

6.1 Oportunidad para medidas basadas en el mercado

Resultados claves:

- La rica biodiversidad de LAC posiciona a la región como líder global en el desarrollo de créditos de carbono de alta integridad, y también tiene el potencial de generar una cantidad significativa de soluciones no basadas en la naturaleza.
- El mercado global del carbono está evolucionando hacia soluciones basadas en la naturaleza de alta integridad. Lo anterior es esencial para mejorar los beneficios medioambientales, pero provocará un aumento de los precios.
- Las eliminaciones artificiales siguen siendo costosas en la actualidad, pero se espera que disminuyan significativamente para 2050, complementando las soluciones basadas en la naturaleza y diversificando la cartera de compensaciones de la región.

6.1.1 Introducción

Esta sección destaca el alcance y la relevancia de los créditos de carbono para la aviación en LAC, dado el papel positivo que puede desempeñar la aviación en la conservación y restauración de ecosistemas globales críticos, así como en la reducción de las emisiones de la agricultura, el sector con mayores emisiones de la región³⁶⁷. Analiza los volúmenes históricos y los precios medios de los créditos de carbono junto con diversas previsiones futuras. Las medidas basadas en el mercado, que incluyen mecanismos como la compensación de carbono, son herramientas de políticas diseñadas para proporcionar incentivos económicos con el fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero mediante la fijación de un precio al carbono; concretamente, los créditos de carbono representan reducciones o eliminaciones de emisiones verificadas que pueden adquirirse para compensar las emisiones en otros lugares. El análisis abarca tanto los créditos de carbono del CORSIA como los del Mercado Voluntario de Carbono (VCM) de proyectos globales y regionales, lo que proporciona una visión general exhaustiva del mercado y sus principales impulsores. Se examina la dinámica de la oferta y la demanda mediante una evaluación de los precios actuales, los proyectos y los marcos de trabajo regulatorios para revelar las tendencias y los avances clave. La sección concluye con una evaluación de las recomendaciones estratégicas para aprovechar el potencial de América Latina como líder en el desarrollo de compensaciones de carbono, identificando recomendaciones para oportunidades dentro del contexto regional.

6.1.2 Antecedentes de los créditos de carbono

Los créditos de carbono son un complemento para un conjunto más amplio de medidas destinadas a abordar el impacto climático de la aviación, y permiten a los grupos de interés de la aviación compensar parte de sus emisiones comprando créditos de carbono verificados generados por proyectos que reducen, evitan o eliminan las emisiones de gases de efecto invernadero fuera del sector de la aviación. Cada crédito corresponde a una tonelada métrica de emisiones equivalentes de CO₂ reducidas o eliminadas, certificadas según los estándares reconocidos para garantizar la integridad y permanencia medioambientales. Los proyectos de créditos de carbono también pueden generar valor económico para los Estados anfitriones al atraer inversiones, crear puestos de trabajo y apoyar el desarrollo local.

Varias aerolíneas ya participan en programas voluntarios de compensación de carbono mediante el apoyo a proyectos certificados que evitan, reducen o eliminan las emisiones de gases de efecto invernadero. El marco global se está desarrollando rápidamente, en particular a través del CORSIA de la OACI, cuyo objetivo es actuar como un marco de trabajo en armonía para compensar las emisiones de los vuelos internacionales, contribuyendo a reducir la brecha entre las emisiones reales y los niveles de línea base acordados para el sector. El CORSIA puede entenderse como un subconjunto del VCM, en el sentido de que se nutre del mismo fondo común de créditos de carbono y utiliza muchos de los mismos registros y estándares que se emplean en la compensación voluntaria. Sin embargo, mientras que el VCM permite a las empresas de todos los sectores adquirir créditos de forma totalmente voluntaria para reclamar reducciones de emisiones, el CORSIA introduce un nivel de supervisión regulatoria específico para la aviación internacional. En el marco del CORSIA, solo se permiten créditos que cumplan los estrictos criterios de elegibilidad de la OACI para efectos de cumplimiento. Esto significa que, aunque no todos los créditos del VCM son elegibles para el CORSIA, todos los créditos utilizados dentro de CORSIA se originan del VCM más amplio.

³⁶⁷ <https://publications.iadb.org/en/benefits-and-costs-reaching-net-zero-emissions-latin-america-and-caribbean>

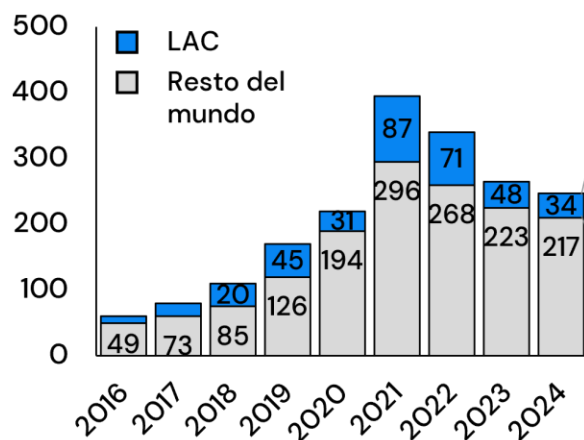
6.2 Mercado global de compensaciones de carbono

6.2.1 Resumen del VCM

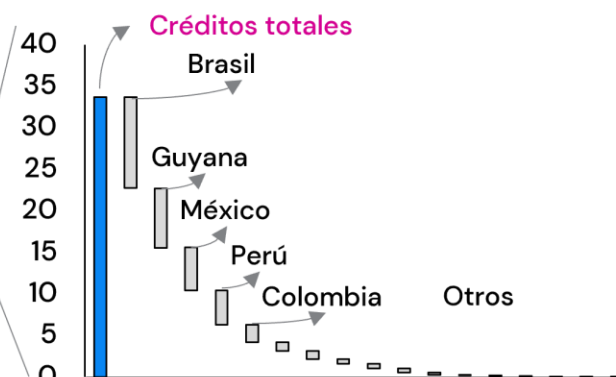
Los datos interanuales revelan una contracción del mercado voluntario de carbono, esto se explica porque están impulsados en gran medida por una mayor atención prestada a la integridad de los créditos. La introducción de metodologías, procedimientos de validación y estándares de integridad más rigurosos ha dado lugar a una reducción del número de proyectos que cumplen los requisitos para la emisión de créditos, lo que ha provocado un descenso significativo de los nuevos créditos que entran en el mercado. Esta tendencia refleja una evolución deliberada del mercado, que se aleja de los créditos antiguos y de menor calidad para acercarse a un sistema más creíble y de mayor integridad. Como se muestra en la siguiente figura, los volúmenes de emisión han disminuido notablemente desde su máximo, con un descenso del 20-25 % desde 2021 registrado en 2024 y una emisión aún más baja en 2025. A medida que disminuyen las emisiones, los retiros de créditos de carbono han aumentado con el tiempo, lo que indica un aumento de la demanda por parte de los compradores para alinearse con los objetivos climáticos³⁶⁸. LAC sigue siendo una fuente principal de emisión de créditos, oscilando históricamente entre el 12 % y el 23 % del total global, con Brasil y Guyana a la cabeza, que representan más del 80 % de los créditos de la región.

La cuota regional en créditos totales emitidos fue 13% en 2024. Los países en el top cuatro han emitido ~80% de los créditos en la región, el 32% son de Brasil y el 21 % de Guyana

Total de créditos emitidos por año y región
Toneladas métricas de carbono (millones)



Composición de los créditos
Toneladas métricas de carbono (millones)



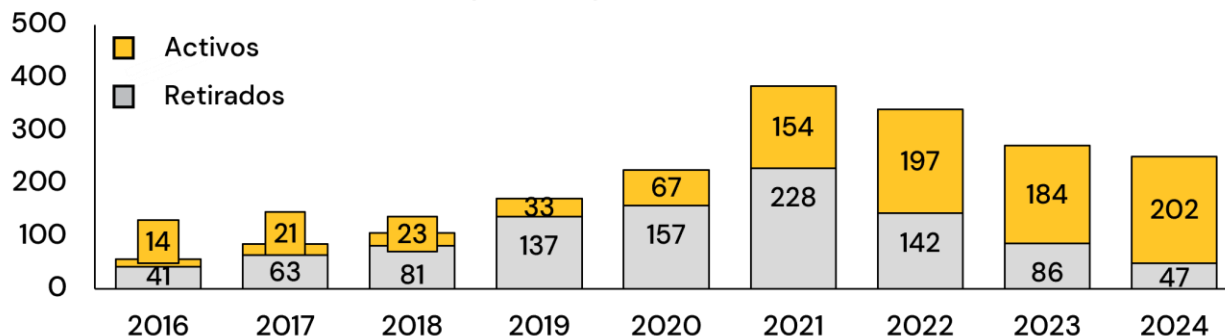
Fuentes: datos de los registros de créditos de carbono voluntarios del top cinco (American Carbon Registry (ACR), Architecture for REDD+ Transactions (ART), Climate Action Reserve (CAR), The Gold Standard (GS), Verified Carbon Standard (VCS), análisis de ICF.

La figura anterior ilustra la relación entre créditos retirados y créditos activos, y parece sugerir una disminución de los retiros, ya que la parte retirada se reduce cada año. Sin embargo, dado que los créditos pueden retirarse a lo largo de varios años, y que los créditos emitidos más recientemente han tenido un tiempo limitado para ser vendidos y retirados, la aparente caída a lo largo del tiempo es una deflación artificial que refleja un artefacto temporal más que una tendencia en los retiros.

³⁶⁸ <https://www.nature.com/articles/s41467-024-51151-w>

Deflación artificial en los retiros de créditos a causa de créditos más recientes con menos tiempo para venderse y retirarse

Estados de los créditos por año
Toneladas métricas de carbono (millones)



Fuentes: datos de los registros de créditos de carbono voluntarios del top cinco (American Carbon Registry (ACR), Architecture for REDD+ Transactions (ART), Climate Action Reserve (CAR), The Gold Standard (GS), Verified Carbon Standard (VCS), análisis de ICF.

Nota: incluye únicamente créditos activos y retirados.

6.2.2 Resumen del CORSIA

Las comparaciones significativas interanuales de los créditos elegibles para el CORSIA dentro del mercado voluntario de carbono comenzaron en 2024, cuando las emisiones sujetas a los requisitos de compensación del CORSIA superaron los niveles de línea base del programa. Aunque los requisitos de compensación están en vigor desde 2021 para las rutas entre los estados que participan voluntariamente, las emisiones del sector durante la fase piloto 2021-2023 se mantuvieron por debajo de la línea base, lo que dio lugar a un factor de crecimiento sectorial (SGF) nulo³⁶⁹. Como consecuencia, las aerolíneas que operaban en rutas del CORSIA no estaban obligadas a comprar compensaciones regulatorias, y la demanda de créditos elegibles para el CORSIA siguió siendo mínima. Esto cambió en 2024, ya que las emisiones superaron el nivel de línea base y las obligaciones de compensación cobraron relevancia operativa.

En 2024, la oferta de créditos elegibles para el CORSIA fue muy baja, ya que el CORSIA es uno de los programas más estrictos del VCM, lo que significa que los créditos que cumplen los requisitos se reconocen generalmente como de la más alta calidad. De los créditos de alta calidad restantes, solo 17 millones cumplían con los estándares CORSIA a nivel global. Además, solo unos 8 millones de estos créditos contaban con la correspondiente carta de autorización (LoA) de los gobiernos anfitriones, que es la aprobación formal necesaria para autorizar el uso de créditos para el cumplimiento del CORSIA, todos ellos procedentes de un único proyecto en Guyana (REDD+ ART TREES). Los créditos que, de otro modo, serían elegibles para el CORSIA, pero carecen de LoA pueden describirse como pendientes del CORSIA, de estos había 7 millones en 2024. De los elegibles para el CORSIA con LoA, el 30 % ya se había comprometido mediante acuerdos plurianuales, lo que dejaba solo unos 5 millones de créditos disponibles en el mercado abierto.

Las emisiones anuales de la aviación global (domésticas e internacionales) alcanzaron los 950 Mt en 2024; sin embargo, las emisiones de los vuelos entre Estados pares sujetos a los requerimientos de compensación del CORSIA alcanzaron un total de 363Mt³⁷⁰. En comparación con una línea base equivalente a 85 % las emisiones de estos Estados pares en 2019, esta dio como resultado un SGF de 15.9 % en 2024, el cual debe ser aplicado por los Estados al calcular sus requerimientos de compensación de 2024, antes de tener en cuenta los combustibles elegibles para el CORSIA. Más allá del panorama de 2024 (siguiente figura), la OACI ha estimado que los requisitos de compensación acumulativos para la primera fase del CORSIA (2024-2026) oscilarán entre 106 y 149 Mt, de los cuales se estima que aproximadamente el

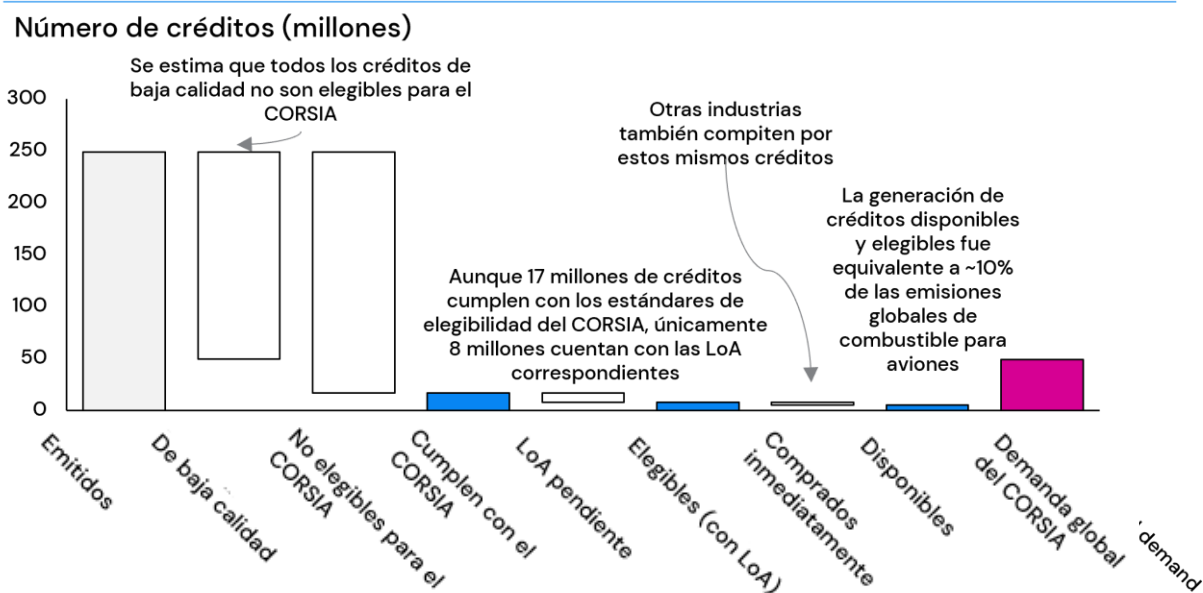
³⁶⁹ El SGF mide en qué medida las emisiones de todo el sector superan la línea base de 2019 y determina la cuota de emisiones que las aerolíneas deben compensar.

³⁷⁰ <https://www.iea.org/energy-system/transport/aviation>; <https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Central%20Registry/CORSIA-Annual-SGF-4ed-2025-web.pdf>

15 % se abordará mediante los combustibles elegibles para el CORSIA (CEF)³⁷¹. Esto deja aproximadamente entre 90 y 127 Mt (acumuladas) sin abordar y que necesitan compensaciones adicionales a lo largo de la Fase 1.

Dada esta demanda, la oferta actual de créditos de carbono elegibles disponibles en el mercado abierto es inferior a la requerida para el CORSIA, y la emisión total de créditos de carbono es inferior al total de emisiones de la aviación. Si bien se espera un aumento de la concesión de créditos, también puede haber una mayor competencia por parte de otros sectores, lo que destaca la importancia de que la aviación utilice una combinación de enfoques para reducir las emisiones.

Subconjunto anidado de créditos de carbono versus demanda del CORSIA, 2024



Fuentes: datos de los registros de créditos de carbono voluntarios del top cinco (American Carbon Registry (ACR), Architecture for REDD+ Transactions (ART), Climate Action Reserve (CAR), The Gold Standard (GS), Verified Carbon Standard (VCS).

Nota: la demanda global estimada del CORSIA está basada en datos del 2023 reportados a la OACI. LoA = carta de autorización.

6.3 Previsiones de precios y volumen

6.3.1 Resumen de resultados

Los resultados de este análisis ilustran un claro aumento de los precios impulsado por los desequilibrios entre la oferta y la demanda. El ICF estima que, en el caso base, se prevé que los precios de los créditos elegibles para el CORSIA aumenten de alrededor de 21,50 dólares por tonelada en 2025 a más de 50 dólares al final de la Fase 2 del CORSIA (véase la siguiente figura). Este aumento de precios va de la mano con el endurecimiento de los estándares de elegibilidad y la limitación de la capacidad de emisión, incluidos los retrasos en las cartas de aceptación y las reformas regulatorias.

Al mismo tiempo, los precios del mercado voluntario han caído por debajo de los 5 dólares para muchos créditos de evitación abundantes, pero se espera que aumenten de forma constante a medida que la preferencia del mercado se incline hacia las eliminaciones de alta integridad, incluyendo biochar y captura y almacenamiento de carbono (CSC). Si bien se espera que el aumento de la demanda incremente el precio de los créditos tradicionales de evitación y eliminación basados en la naturaleza es posible que tenga un efecto diferente en las eliminaciones artificiales. Es probable que estas tecnologías, como la DAC, se amplíen a medida que las opciones convencionales se vean limitadas.

³⁷¹ https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/CORSIA/Documents/CAEP_Inputs-to-2025-CORSIA-periodic-review-C235.pdf

Sus costos se verán influidos principalmente por el progreso tecnológico, más que por la escasez del mercado. Actualmente, la DAC tiene un costo de abatimiento estimado entre 1000 y 1300 dólares por tonelada de CO₂e. Sin embargo, con menores gastos de capital y una reducción del riesgo gracias a una rápida implementación, los costos podrían caer por debajo de los 600 dólares por tonelada en 2050.

En las siguientes secciones se detallan las principales conclusiones cualitativas y cuantitativas, con referencia al desglose de los créditos emitidos frente a los retirados, los factores que impulsan la escalada de precios, la expansión prevista de la oferta mediante la reforma regulatoria (especialmente las LoA) y el papel de las soluciones basadas en la naturaleza.

6.3.2 Metodología y supuestos

Este análisis requirió un repositorio de todos los créditos emitidos, incluyendo información sobre su ubicación y su elegibilidad para el CORSIA. Con ese fin, el ICF creó una base de datos del volumen de créditos a partir de los cinco principales registros voluntarios de créditos de carbono (American Carbon Registry (ACR), Architecture for REDD+ Transactions (ART), Climate Action Reserve (CAR), The Gold Standard (GS) y Verified Carbon Standard (VCS)), que en conjunto representan más del 98 % de la emisión global ³⁷²de VCM desde 2016, con un seguimiento detallado del origen, los retiros y el tipo de los proyectos. Dado que se limita a los cinco registros principales, esta base de datos no incluye registros más pequeños, proyectos especializados ni contratos bilaterales privados de compra (a menos que dichos contratos den lugar a una transacción de crédito [emisión, transferencia o retirada] dentro del propio registro). Este repositorio se utilizó para comprender los volúmenes históricos de créditos, que también sirvieron como punto de referencia para las proyecciones de volumen y la fijación de precios. La evaluación de la elegibilidad crediticia para su inclusión en la base de datos tuvo en cuenta la antigüedad del proyecto (2016+), la selección de calidad, las cartas de aceptación del gobierno anfitrión y las actualizaciones del estado regulatorio.

Los precios históricos del crédito se obtuvieron a partir de los precios del mercado al contado global y regional de S&P Global Energy, validados mediante comunicaciones con corredores que hacían referencia a los precios de proyectos individuales. Las proyecciones de precios y volumen para el futuro utilizan como punto de partida los precios de los créditos para 2025, establecidos como se ha indicado anteriormente, y luego modelan la subida y bajada de los precios según un conjunto de diferentes escenarios futuros de políticas y mercados, basados en la información proporcionada por un conjunto de instituciones acreditadas y en la retroalimentación de los grupos de interés, para crear escenarios de proyección. Los supuestos considerados en este análisis tanto para VCM como para CORSIA incluyen las desarrolladas por Abatable, BloombergNEF, Statista, CarbonCredits.com y MSCI, junto con datos históricos de S&P Global Energy. Un factor clave en estas proyecciones es la tasa de aprendizaje de las tecnologías de eliminación de carbono artificiales, como la DAC. Investigaciones recientes sugieren que la reducción de costos de estos métodos probablemente se produzca más lentamente de lo previsto inicialmente. Estudios exhaustivos que examinan escenarios de implementación a escala de la DAC estiman que los costos de abatimiento en 2050 oscilarán entre 230 y 540 dólares por tonelada y, en algunos casos, entre 100 y 600 dólares por tonelada³⁷³. Para alcanzar el límite inferior de estos rangos de costos será necesario aplicar elevadas tasas de aprendizaje, lo que depende de un despliegue acelerado respaldado por marcos de trabajo regulatorios que garanticen la certeza de la demanda.

Todos los supuestos se muestran en la siguiente tabla. Supuestos como estos sirven de base para los pronósticos de precios y ayudan a aclarar qué créditos probablemente podrán satisfacer la demanda en cada escenario. El rango de precios proyectado por el ICF tanto para el VCM como para el CORSIA viene determinado por los supuestos que se resumen en la siguiente tabla.

Esta metodología combina y promedia los pronósticos cuantificados de los principales investigadores de mercado (como Abatable, BloombergNEF y otros) en escenarios unificados bajos, medios y altos con un conjunto similar de supuestos, alineando sus proyecciones en un plazo común para que puedan compararse y evaluarse directamente entre sí. Agrupar y comparar las proyecciones de varios investigadores líderes del mercado permite tener en cuenta una gama más amplia de supuestos y reduce el sesgo inherente a basarse en un solo pronóstico. Por ejemplo, los supuestos de los casos bajo, medio y alto incorporan los efectos de diversos plazos de implantación de la LoA y el aumento de la inversión en tecnologías de acreditación de carbono. En los casos medio y alto, la limitación del suministro en la década de 2020 refleja directamente los cuellos de botella derivados de las cartas de autorización limitadas, cuya expansión gradual se tiene en cuenta en la recuperación de precios prevista para la década de 2030 y años posteriores, mientras que en el escenario bajo las cartas de autorización son menos restrictivas. Del mismo modo, todos los escenarios muestran el impacto del progreso tecnológico, mostrando cómo evoluciona la oferta a lo largo del tiempo. Inicialmente, existe un

³⁷² https://perspectives.cc/wp-content/uploads/2024/07/PCG_CCPs-AF-analysis_07_2024.pdf

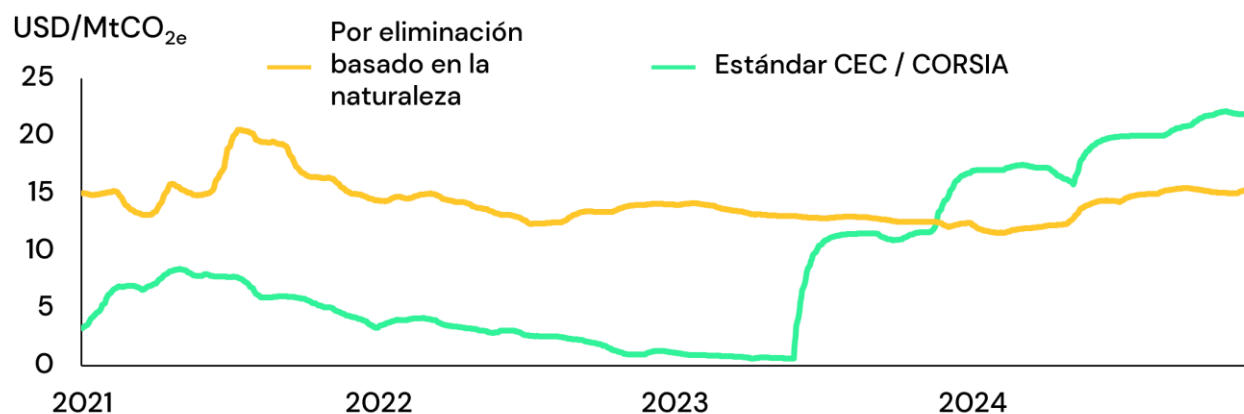
³⁷³ <https://ethz.ch/en/news-and-events/eth-news/news/2024/03/cost-of-direct-air-carbon-capture-to-remain-higher-than-hoped.html>; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590332223003007>

exceso de oferta de créditos de evitación de menor calidad, lo que ralentiza el desarrollo del mercado. Sin embargo, a medida que en la década de 2030 y más adelante se disponga de nuevos métodos de eliminación (a menudo impulsados por la tecnología), la oferta se orientará hacia eliminaciones de mayor integridad. Estos supuestos tienen en cuenta la implantación gradual de nuevas tecnologías y los retrasos en la inversión de capital, que influyen tanto en los precios como en la dinámica del mercado. Si bien, en general, esta metodología proporciona un enfoque estructurado para integrar múltiples pronósticos, sigue habiendo incertidumbre debido a la sensibilidad en torno al momento y la escala de la emisión de LoA y los avances tecnológicos. Estos factores introducen una variabilidad que ha sido captada de forma direccional por esta metodología, pero el alcance total de su impacto es difícil de cuantificar con precisión, por lo que las proyecciones resultantes deben considerarse como rangos indicativos y no como pronósticos exactos.

Tabla58: Supuestos para las proyecciones de precios del VCM de ICF y CORSIA

Bajo (exceso de oferta)	Medio (caso base)	Alta (demanda agresiva)
<p><i>VCM: Los créditos de evitación predominan hasta 2050, los estándares de integridad siguen siendo débiles y el exceso de oferta mantiene los precios anclados cerca de los costos del proyecto.</i></p> <p>CORSIA: Se espera que la oferta de créditos del CORSIA supere la demanda de compensación durante la Fase 1, lo que provocará una caída de los precios. En la Fase 2, un enfoque más relajado por parte de los gobiernos o la OACI para legislar la integridad de los créditos o exigir resultados en materia de créditos da lugar a una menor demanda y a un mercado con un exceso de oferta persistente.</p> <p><i>Tecnología: No avanza ni crece significativamente debido a la demanda y a la implementación limitadas, dada la oferta excesiva de créditos baratos y de baja integridad.</i></p>	<p>VCM: La oferta se reduce a mediados y finales de la década de 2020 debido a las autorizaciones limitadas y a una supervisión más estricta, lo que provoca una presión al alza sobre los precios en la década de 2030. La demanda de emisiones de mayor calidad aumenta progresivamente la disponibilidad de eliminaciones artificiales.</p> <p>CORSIA: Se espera que los precios de los créditos del CORSIA aumenten considerablemente a corto plazo, impulsados por la escasez de créditos como consecuencia de la falta de cartas de aceptación. Los precios siguen aumentando durante la Fase 2 y más allá, pero a un ritmo más lento a medida que el mercado se ajusta y se ponen en marcha nuevos proyectos.</p> <p><i>Tecnología: Un despliegue moderado provoca una cierta disminución de los costos y aumenta la disponibilidad de las eliminaciones de alta integridad.</i></p>	<p>VCM: La oferta limitada hasta 2030, impulsada por el aumento de las normas de cumplimiento y las reglas de eliminación exclusiva, alimenta una fuerte competencia y precios elevados para los créditos de alta integridad, mientras que el exceso de oferta anterior y el enfoque en los créditos de evitación de baja calidad retrasan la inversión en tecnología de eliminación, lo que hace que las eliminaciones convencionales y tradicionales sean escasas y costosas.</p> <p>CORSIA: El aumento de la demanda de créditos del CORSIA impulsa al alza los precios, impulsado inicialmente por el fuerte crecimiento de la aviación y la lenta adopción de SAF en la Fase 1 de CORSIA. La demanda sigue aumentando en la Fase 2, cuando CORSIA se amplía para incluir a más países.</p> <p><i>Tecnología: Madura lentamente al principio y luego se difunde rápidamente una vez que aumenta la demanda, lo que reduce los costos de las eliminaciones de alta integridad.</i></p>

Históricamente, el precio de los créditos del mercado voluntario de carbono basados en la naturaleza se ha ubicado en el extremo superior comparado con los créditos del CORSIA, esa tendencia ha cambiado recientemente



Fuente: S&P Global Energy, ©2025 by S&P Global Inc. Análisis de ICF.

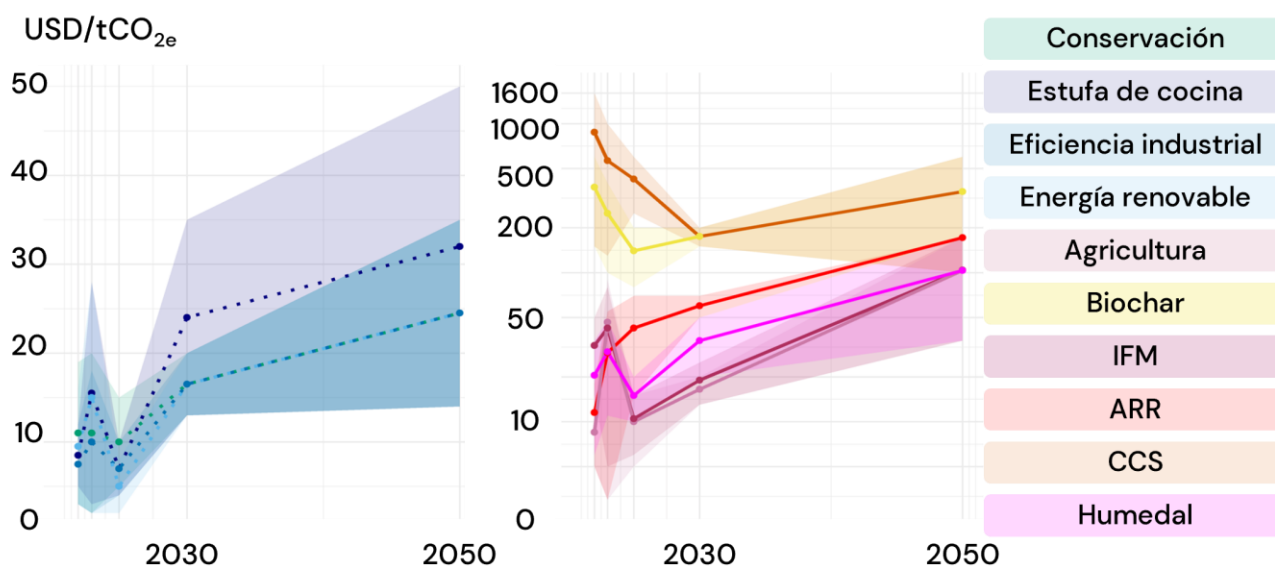
Notas: modificados para este análisis con un factor exponencial de amortiguación de 0,9 para proteger la confidencialidad de los datos; limitado a partir del 2021 y en adelante debido a limitantes en la disponibilidad de los datos; CEC: CORSIA Eligible Credit.

6.3.3 VCM

El principal factor determinante del precio del crédito en el VCM, tanto históricamente como en el futuro, es el tipo de crédito concedido. Los créditos de evitación se generan mediante proyectos que previenen emisiones futuras; a efectos de este análisis, se dividen en las siguientes categorías: estufas de cocina (sustitución de cocinas ineficientes por otras más eficientes), conservación/REDD+, energías renovables y eficiencia industrial. Este tipo de proyectos suelen tener precios más bajos porque se enfrentan a un exceso de oferta persistente como resultado de los menores costos de desarrollo de los proyectos, las limitaciones de adicionalidad y las continuas preocupaciones sobre la integridad, lo que reduce la confianza de los compradores. Por otro lado, los créditos de remoción implican extraer activamente carbono de la atmósfera y secuestrarlo; a efectos de este análisis, se dividen en las siguientes categorías: CCS (captura y almacenamiento de carbono), biocarbón, ARR (forestación, reforestación y revegetación), IFM (gestión forestal mejorada) y eliminación mediante la implementación de prácticas de acumulación de carbono o restauración en entornos agrícolas o humedales. Estos créditos conllevan mayores costos de desarrollo debido a los requisitos tecnológicos, de infraestructura, monitoreo y verificación. En consecuencia, alcanzan precios elevados impulsados por la oferta limitada, la creciente demanda de alta integridad y las preferencias del mercado por el secuestro de carbono a largo plazo. Esta divergencia en los precios se ve reforzada por factores como el tamaño del proyecto, el riesgo de la ubicación, los cobeneficios (por ejemplo, la biodiversidad o el impacto social), la antigüedad y la reputación del promotor, pero ninguno de ellos sustituye al tipo de proyecto como factor determinante primordial. En todos los escenarios pronosticados, la escasez y el rigor de las eliminaciones las diferenciarán de los créditos de evitación, consolidando su papel como los créditos de mayor valor en un mercado voluntario de carbono en fase de maduración.

En general, los precios del crédito del VCM han caído entre 2022 y 2025, a menos de 5 dólares por tonelada de CO_{2e} para muchos proyectos de prevención y algunos proyectos de eliminación. Esto se debe al exceso persistente de oferta de créditos de evitación; el exceso de oferta heredado mantiene altos los volúmenes del VCM y los precios bajos, ya que muchos de los créditos disponibles se consideran de menor calidad o menos adicionales, lo que limita el crecimiento de los precios a corto plazo. A partir de 2025, se prevé que los precios del VCM aumenten de forma constante a medida que el mercado experimente un cambio hacia créditos de mayor integridad. El endurecimiento de los criterios de calificación, los cambios regulatorios y el aumento de los compromisos corporativos y sectoriales, especialmente en lo que respecta a las eliminaciones, impulsan los precios al alza a largo plazo. Una tendencia contraria a esta afirmación general se observa en los créditos de biocarbón, CCS y ARR, que comienzan con precios elevados y disminuyen a medida que las tecnologías se desarrollan, estabilizándose entre 100 y 600 dólares por crédito en 2050. Estos créditos requieren una inversión inicial considerable en tecnología e infraestructura, incluyendo métodos de monitoreo novedosos y verificaciones rigurosas para garantizar la permanencia del carbono y el cumplimiento de estrictos estándares de calidad e integridad. La siguiente figura ilustra la subida y bajada de los precios del crédito del VCM.

Pronóstico del VCM, evitación (izq.) y eliminación (der.)



Fuentes: S&P Global Energy, ©2025 by S&P Global Inc., Abatable, BloombergNEF, Statista, CarbonCredits.com, Young et al., 2023, ETH Zurich
 Nota: el precio de eliminación es una escala tipo log.

6.3.4 CORSIA

El precio de las compensaciones elegibles para el CORSIA depende en gran medida de si un proyecto ha obtenido un ajuste correspondiente (CA). Un CA es el ajuste contable formal exigido por CORSIA para garantizar que una reducción de emisiones transferida internacionalmente no se contabilice dos veces (es decir, una vez por el país anfitrión y otra vez por la aerolínea que utiliza la compensación para cumplir con la regulatoria). Las compensaciones que tienen un CA (o que se espera que la reciban) son más costosas porque la oferta sigue siendo limitada y las aerolíneas deben utilizarlas para cumplir con CORSIA. Con solo unos pocos ajustes correspondientes en vigor, la escasez es una de las presiones alcistas más fuertes sobre los precios de las compensaciones del CORSIA.

Los mecanismos de los seguros también influyen en los precios. Estos productos protegen la integridad medioambiental y la validez regulatoria de las compensaciones elegibles para CORSIA. Por ejemplo, Gold Standard ha aprobado el seguro de Oka. Si un ajuste correspondiente falla y las compensaciones dejan de ser válidas para el cumplimiento de CORSIA, el seguro indemniza al promotor y, según lo acordado, garantiza la sustitución por otras compensaciones elegibles. Esta cobertura de riesgos, a su vez, aumenta los costos generales.

Los modelos de escenarios específicos del CORSIA basados en diversas fuentes³⁷⁴ sugieren que el precio de mercado de los créditos elegibles aumentará sustancialmente, pasando de aproximadamente 21,5 dólares por crédito en 2025 a alrededor de 50 dólares al final de la Fase 2 de CORSIA en 2035. La variabilidad de los precios depende del equilibrio entre las restricciones de la oferta y el crecimiento de la demanda, con posibles escenarios que van desde el exceso de oferta (que conduce a una menor subida de los precios) hasta una fuerte escalada de los precios impulsada por la alta demanda.

La trayectoria destaca cómo el equilibrio entre la oferta y la demanda será fundamental para la formación de precios del CORSIA durante la próxima década. En un escenario de exceso de oferta, los generosos requisitos de elegibilidad y la supervisión limitada por parte de la OACI permiten un amplio flujo de créditos hacia el sistema, lo que modera los costos para las aerolíneas, mientras que unos procesos de autorización más estrictos y una aplicación más rigurosa de la integridad podrían limitar la emisión de proyectos, amplificando la escasez y empujando los precios al alza a medida que se aumentan los requisitos de compensación en la Fase 2, cuando la cobertura se extiende a otros mercados aeronáuticos importantes. En general, la trayectoria de CORSIA hasta 2035 está determinada por tres factores claves:

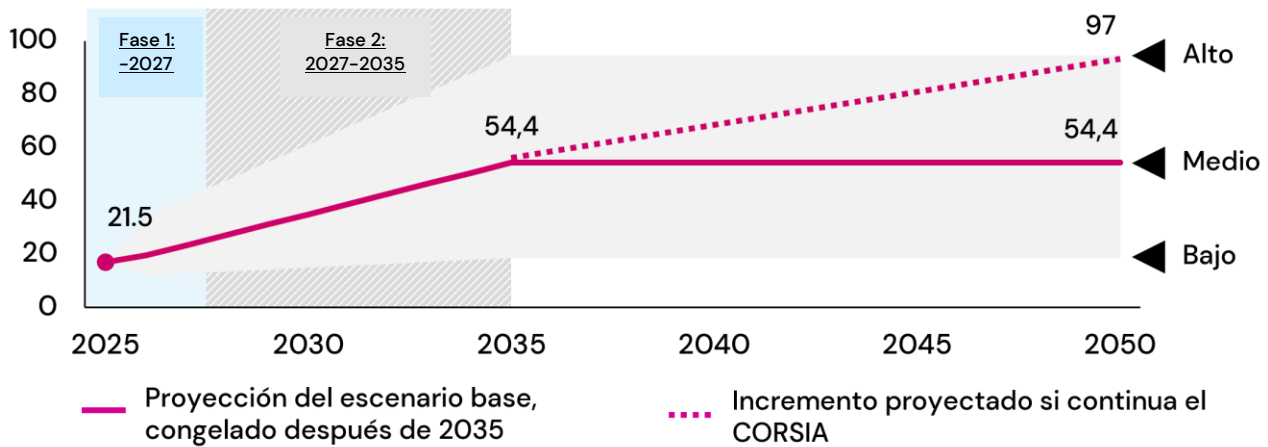
³⁷⁴ Incluye: S&P Global Energy, ©2025 by S&P Global Inc., Abatable, BloombergNEF, and MSCI.

el ritmo de crecimiento de la aviación entre los países participantes, el grado de supervisión de la calidad crediticia y la rapidez con la que se ponen en marcha nuevas fuentes de suministro. Si la oferta sigue superando a la demanda, es probable que los precios se mantengan relativamente bajos; si las restricciones se acentúan justo cuando la demanda se acelera, los precios podrían alcanzar o superar el límite superior de los rangos previstos.

Dada la incertidumbre actual de la OACI en torno a las fases posteriores a 2035, la influencia del programa no llega a configurar trayectorias a largo plazo, dejando que la dinámica futura quede determinada por las decisiones políticas pendientes. Las proyecciones de precios del CORSIA (que se muestran a continuación) reflejan el panorama actual de los créditos y la madurez tecnológica, mientras que el modelo de precios del VCM se basa en diferentes fuentes de datos y supuestos, por lo que las cifras no son directamente comparables y pueden divergir a medida que evolucionan los mercados.

Se estima que el precio de créditos del CORSIA se duplicará con creces en una década. Hay mucha incertidumbre respecto a los precios de créditos del CORSIA en el largo plazo

Precio del crédito del CORSIA en el tiempo, actual y proyectado (USD)



Fuente: S&P Global Energy, ©2025 by S&P Global Inc., Abatable, BloombergNEF, MSCI. Análisis de ICF.

6.4 Créditos de carbono en LAC

6.4.1 Panorama general del mercado regional

LAC ha desempeñado históricamente un papel importante en el VCM, representando entre el 13 % y el 23 % de la emisión global de créditos en los últimos cinco años. Si bien los primeros proyectos consistían en una combinación de actividades relacionadas con las energías renovables y la silvicultura, recientemente la región ha dado prioridad a los créditos de mayor calidad, elegibles para CORSIA y basados en la naturaleza, la mayoría de los cuales se refieren a los ámbitos de la silvicultura o la biodiversidad. A partir de 2025, los créditos en Sudamérica se generan principalmente a través de proyectos REDD+, que exigen la reducción de las emisiones derivadas de la deforestación y la degradación forestal, así como la conservación, la gestión forestal sostenible y la mejora de las reservas de carbono. La cuenca del Amazonas y los ecosistemas circundantes posicionan a América Latina como una de las zonas de crecimiento más importantes para las compensaciones basadas en la naturaleza y la deforestación evitada a través de REDD+ y proyectos relacionados. Sin embargo, solo una parte de este potencial cuenta actualmente para CORSIA, ya que los filtros de elegibilidad y los procesos de autorización de los países anfitriones limitan la rapidez con la que las soluciones basadas en la naturaleza pueden traducirse en un suministro conforme.

La importancia de la región se ve reforzada por un entorno político dinámico. Varios países están impulsando innovaciones relacionadas con el carbono, entre ellas la introducción de impuestos sobre el carbono y sistemas de comercio de emisiones (con México, Colombia, Chile, Brasil y Argentina a la cabeza en este aspecto), reformas legales destinadas a abordar los derechos sobre el carbono y la distribución de beneficios, y la evolución de los LoA que determinan el uso de los créditos en virtud del artículo 6 del Acuerdo de París. Estos desarrollos están aumentando las oportunidades de mercado y contribuyendo a atraer inversiones hacia carteras de proyectos de alta calidad.

Al mismo tiempo, el escalonamiento de la oferta de créditos aptos para la aviación requerirá avances técnicos e institucionales significativos. El cumplimiento de los estándares internacionales de aviación en materia de medición, reporte y verificación (MRV), así como de las líneas base, requiere mayores capacidades técnicas, así como aprobaciones reglamentarias optimizadas que puedan reducir los retrasos en la comercialización de los proyectos. Algunos países de la región han logrado avances gracias a sistemas avanzados de MRV, como Guyana y su marco de trabajo de resolución de 1 hectárea. Sin embargo, es necesaria una adopción regional más amplia de estas sólidas infraestructuras de MRV para satisfacer las necesidades de cumplimiento en constante evolución³⁷⁵. La eficacia con la que la región aborde estos retos desempeñará un papel decisivo en la configuración del futuro de LAC como *hub* global de créditos de carbono.

Guyana se ha convertido en líder global al ser el primer país en emitir cartas de autorización (LoA) autorizadas por CORSIA para créditos de carbono. A través de un proceso colaborativo en el que participó Architecture for REDD+ Transactions (ART), Guyana emitió créditos TREES jurisdiccionales con los ajustes correspondientes para más de 18 millones de hectáreas de bosque en el país (aproximadamente el 85 % del territorio de Guyana), cumpliendo explícitamente los estrictos requisitos de elegibilidad del CORSIA, lo que permitiría a las aerolíneas internacionales comprar y retirar estos créditos para el cumplimiento regulatorio.

De cara al futuro, la oferta de créditos de la región se verá condicionada por protocolos de validación más estrictos y requisitos de calidad más exigentes. Se espera que estas medidas, aunque esenciales para la credibilidad, limiten la disponibilidad general de crédito. Además, se espera que la demanda de estos créditos sea fuerte, ya que se ajustan tanto a los requisitos de cumplimiento como al interés de los compradores por soluciones basadas en la naturaleza de alto impacto. Como resultado, se prevé que la competencia en el mercado se intensifique y que los aumentos de precios continúen al menos hasta 2035. Esta dinámica es especialmente relevante para el sector de la aviación, que se enfrenta a crecientes obligaciones de cumplimiento como parte del trabajo del CORSIA y competirá con otras industrias por un conjunto limitado de créditos elegibles.

6.4.2 Estudios de casos sobre mercados de carbono

6.4.2.1 Argentina

La oferta crediticia actual en Argentina sigue siendo limitada, ya que la mayor parte de la actividad del mercado es de alcance provincial y de escala incipiente. Han surgido algunos proyectos piloto aislados, como el esfuerzo REDD+ en provincias como Córdoba, Neuquén y Misiones³⁷⁶, pero aún no existe un marco de trabajo federal consolidado para coordinar los esfuerzos. Esta fragmentación muestra la estructura de gobierno federal de Argentina, en la que las provincias conservan una autoridad significativa sobre la gestión de los recursos naturales. Esa dinámica genera tanto oportunidades para la experimentación local como riesgos de inconsistencia regulatoria para los inversionistas. Dicho esto, la base de recursos naturales de Argentina es enorme y ofrece un gran potencial futuro en los sectores forestal, agrícola y energético. La realización de ese potencial depende de la expansión de las carteras de proyectos y del establecimiento de una supervisión federal optimizada.

6.4.2.2 Brasil

Brasil ha producido el mayor número de créditos de carbono de LAC en circulación en la actualidad, lo que representa casi un tercio de todos los créditos de LAC en 2024³⁷⁷. En 2024, el mercado brasileño alcanzó aproximadamente los 2110 millones de dólares y se pronostica que crezca hasta alcanzar casi los 25 000 millones de dólares en 2033³⁷⁸. Este rápido crecimiento del mercado brasileño del carbono está impulsado por los avances regulatorios, entre los que se incluye el Sistema Brasileño de Comercio de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (SBCE), que establece las reglas del mercado, hace hincapié en los estándares de conservación y restauración, y permite la interoperabilidad entre los mercados voluntarios y regulados³⁷⁹. Si bien el mercado crediticio actual de Brasil ya es muy amplio, el país posee la mayor parte de la selva amazónica, lo que representa una oportunidad significativa para aumentar la oferta de créditos y ampliar las carteras existentes a créditos de alta calidad aptos para la aviación.

6.4.2.3 Chile

El VCM de Chile se encuentra en un periodo de rápido desarrollo, respaldado por un sólido marco de trabajo regulatorio. El Sistema de Compensación de Emisiones (SCE) de Chile permite a los grandes emisores (más de 25 000 tCO₂/año)

³⁷⁵ <https://escholarship.org/content/qt9mf72304/qt9mf72304.pdf>

³⁷⁶ <https://carbon-pulse.com/421906/>

³⁷⁷

https://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/2397/ENG_Bolet%C3%ADn%20N%C2%B05%20E2%80%93%20ILACC.pdf?sequence=4&isAllowed=y

³⁷⁸ <https://www.imarcgroup.com/brazil-carbon-credits-market>

³⁷⁹ <https://www.gov.br/planalto/en/latest-news/2024/12/president-lula-signs-law-creating-regulated-carbon-market-in-brazil>

cumplir los requisitos del impuesto sobre el carbono mediante la compra de créditos de carbono nacionales³⁸⁰. En 2024, la SCE impulsó la retirada de más de 4,4 millones de créditos de carbono (frente a los apenas 260 000 de 2023, cuando se introdujo la política por primera vez)³⁸¹ o que destaca tanto el aumento de la demanda como el papel fundamental de los instrumentos de mercado para cumplir los objetivos de las NDC. Chile se encuentra en una buena posición para seguir desarrollando proyectos de créditos de carbono; el Gobierno chileno ha reconocido los principales estándares internacionales (VCS de Verra, Gold Standard, BioCarbon Registry y Cercarbono), lo que garantiza la integridad del suministro y la alineación con los mercados globales, y las recientes resoluciones jurídicas han aclarado la elegibilidad de los créditos certificados tanto a nivel nacional como internacional. Cada vez son más los proyectos locales, especialmente en los ámbitos de la agricultura, la silvicultura y el uso de la tierra (AFOLU), que se están poniendo en marcha.

6.4.2.4 Colombia

Colombia cuenta con uno de los mercados nacionales de carbono más avanzados de América Latina. Su ley sobre el impuesto al carbono, vigente desde 2017, ha permitido a las empresas compensar sus obligaciones fiscales mediante la compra de créditos de proyectos nacionales, lo que ha impulsado un rápido desarrollo de proyectos en los sectores forestal, agrícola y de energías renovables. Gracias en parte a esa política, desde 2002 se han certificado más de 230 proyectos colombianos (lo que ha permitido mitigar más de 231 Mt CO_{2e}). Sin embargo, el mercado colombiano del carbono sufrió un importante revés en 2023, cuando el Gobierno impuso un límite que restringía el uso de créditos nacionales para compensar solo el 50 % de las obligaciones fiscales relacionadas con el carbono. Este cambio de política redujo drásticamente la demanda y debilitó los precios, lo que provocó un exceso de oferta con aproximadamente 63,7 millones de créditos de carbono sin vender a finales de 2024. El precio de mercado cayó desde un máximo anterior de 22 000 COP (≈ 5,94 dólares) por crédito a un rango de entre 12 000 y 16 000 COP (≈ 3,24-4,32 dólares)³⁸². El cambio generó incertidumbre, pero también ofreció una oportunidad para los compradores, que ahora controlan los precios.

El exceso de oferta y la contención de los precios actuales están limitando el crecimiento a corto plazo, no por falta de desarrollo de proyectos o de emisiones, sino porque la demanda se ve restringida por el diseño de las políticas nacionales. Las abundantes reservas forestales y la biodiversidad de Colombia ofrecen un gran potencial, especialmente para proyectos de REDD+, ARR, uso de la tierra y energías renovables, con ARR ya en fase de escalonamiento y créditos de carbono vendidos en los mercados internacionales. Se espera una expansión a medida que sean más proyectos con mayor integridad sean certificados por varios estándares y el mercado de carbono madure y crezca. Cercarbono, un registro nacional colombiano, ha recibido la aprobación condicional de la Fase 1 para múltiples metodologías novedosas de eliminación basadas en la naturaleza y prevé cumplir todos los requisitos del CORSIA³⁸³. Esta madurez regulatoria y diversidad de proyectos convierten a Colombia en líder regional en créditos de carbono.

6.4.2.5 Guyana

Guyana destaca en LAC por su liderazgo en los mercados jurisdiccionales de carbono REDD+ con el proyecto ART TREES, el único programa a nivel global que ha emitido créditos de carbono TREES. Con una superficie aproximada de 18 millones de hectáreas (el 87 % de la superficie forestal del país), el proyecto emitió 33,47 millones de créditos para el período 2016-2020 y 7,14 millones de créditos adicionales para 2021, lo que posiciona a Guyana como el único proveedor de créditos elegibles para CORSIA con cartas de autorización válidas en 2024. Esta iniciativa jurisdiccional REDD+ protege alrededor de 21 800 millones de toneladas de CO_{2e} al evitar la deforestación y promover la reforestación, lo que demuestra el potencial de los países con bosques tropicales para liderar el suministro de créditos de carbono de alta integridad.

6.4.2.6 México

En 2023, México fue el primer país de América Latina en poner en marcha un sistema de comercio de derechos de emisión (ETS), que establece límites a las emisiones de carbono de los sectores energético e industrial³⁸⁴. El segmento del mercado de carbono regulado es actualmente el más grande del país, y el impuesto sobre el carbono ha dado lugar a una reducción de 1,8 Mt CO_{2e} cada año, aunque el segmento del mercado voluntario

³⁸⁰ <https://www.green.earth/news/corporate-demand-grows-for-chiles-carbon-credits>

³⁸¹ <https://www.argusmedia.com/en/news-and-insights/latest-market-news/2687085-colombia-s-offset-cap-drops-carbon-market-demand>

³⁸² <https://www.argusmedia.com/en/news-and-insights/latest-market-news/2687085-colombia-s-offset-cap-drops-carbon-market-demand>

³⁸³ <https://www.clearbluemarkets.com/knowledge-base/cercarbono-methodology-and-procedure-updates>

³⁸⁴ https://icapcarbonaction.com/system/files/ets_pdfs/icap-etsmap-factsheet-59.pdf

está creciendo rápidamente³⁸⁵. México tiene objetivos ambiciosos de reducción de GEI y pretende reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero en un 35 % para 2030³⁸⁶. El establecimiento del ETS en México y el énfasis en la reducción de carbono consolidan su posición como una región clave para el desarrollo futuro de proyectos de compensación de carbono. Más concretamente, como uno de los principales mercados para las exportaciones agrícolas y alimentarias de Estados Unidos, México está llamado a convertirse en líder en compensaciones de carbono a través de proyectos agrícolas y de cambio en el uso del suelo.

6.4.2.7 Perú

Tras la aprobación de Verra VCS en 2025, es probable que Perú continúe ampliando su oferta de proyectos de desarrollo de carbono³⁸⁷. Perú tiene la cuarta mayor cobertura forestal del mundo y un potencial significativo para impulsar amplios proyectos de reforestación³⁸⁸. El mercado de carbono de Perú está valorado actualmente en 650 millones de dólares y es uno de los más pequeños de América Latina, sin embargo, se prevé que crezca un 40 % para 2033³⁸⁹. Los sectores federal y privado han adoptado rápidamente los protocolos de mitigación, y Perú tiene como objetivo alcanzar emisiones netas cero para 2050. Para implementar su mercado de cumplimiento, Perú llevó a cabo un exhaustivo período de consulta pública con el fin de crear reglas sustantivas y aumentar el cumplimiento. A pesar de estos aspectos positivos, se han producido obstáculos jurídicos, ya que las reducciones de emisiones no se han registrado en el RENAMI (Registro Nacional de Medidas de Mitigación de GEI) y el Fondo Nacional del Ambiente del Perú no ha gestionado eficazmente los pagos basados en los resultados de REDD+. Los gobiernos nacionales y regionales fragmentados y la falta de claridad en la propiedad de los derechos de emisión de carbono complican aún más el mercado³⁸⁸.

6.4.3 Precios por país

En LAC, la media del crédito por evitación basado en la naturaleza oscila entre 2 y 8 dólares, y la media del crédito por eliminación basado en la naturaleza oscila entre 8 y 24 dólares³⁹⁰. Según datos de S&P Global Energy, en los países donde se han desarrollado ambos tipos de créditos, concretamente Brasil y Colombia, las eliminaciones basadas en la naturaleza son mucho más elevadas que los créditos de prevención. Esto concuerda con las proyecciones globales.

Los datos que se muestran en la siguiente figura se limitan a registros de créditos de carbono del S&P Global Energy, la cual se refiere a un precio de compra, venta o transacción comunicado para un crédito de carbono específico recopilado de los participantes en el mercado. Estos registros no incluyen todos los créditos de carbono emitidos en todo el mundo, por lo que existen diferencias notables (por ejemplo, en México faltan los créditos de evitación basados en la naturaleza), y el número de registros por país y tipo de crédito oscila entre 4 y 155. La gráfica se muestra aquí con el fin de proporcionar información orientativa sobre los precios comparativos.

³⁸⁵ https://icapcarbonaction.com/system/files/document/201025_idb_compliancevoluntary_paper-rz.pdf#:~:text=Los%20créditos%20REDD+%20certificados%20por%20Verra%20representan%20actualmente,en%20la%20región%20en%2020%20y%202021.

³⁸⁶ <https://climatepromise.undp.org/what-we-do/where-we-work/mexico>

³⁸⁷ <https://verra.org/peru-approves-verras-vcs-program-and-two-methodologies-advancing-climate-action-and-carbon-market-integrity/>

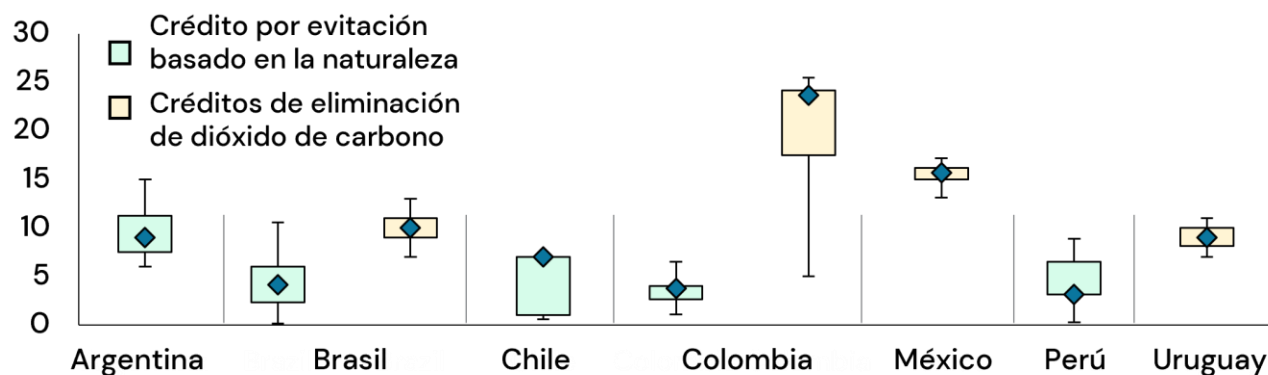
³⁸⁸ https://www.cifor-icraf.org/publications/pdf_files/infobrief/8750-Infobrief.pdf

³⁸⁹ <https://www.cognitivemarketresearch.com/regional-analysis/south-america-carbon-credits-market-report>

³⁹⁰ S&P Global Energy, ©2025 by S&P Global Inc.

Los precios de los créditos de carbono varían por país y por tipo

Precio del crédito por tipo y país – 2024 (USD/tCO_{2e})



Fuente: S&P Global Energy, ©2025 by S&P Global Inc. Análisis de ICF.

Nota: las líneas indican el rango complete, mientras que las barras representan el rango intercuartil.

6.5 Estrategia y recomendaciones

6.5.1 Gobiernos en LAC

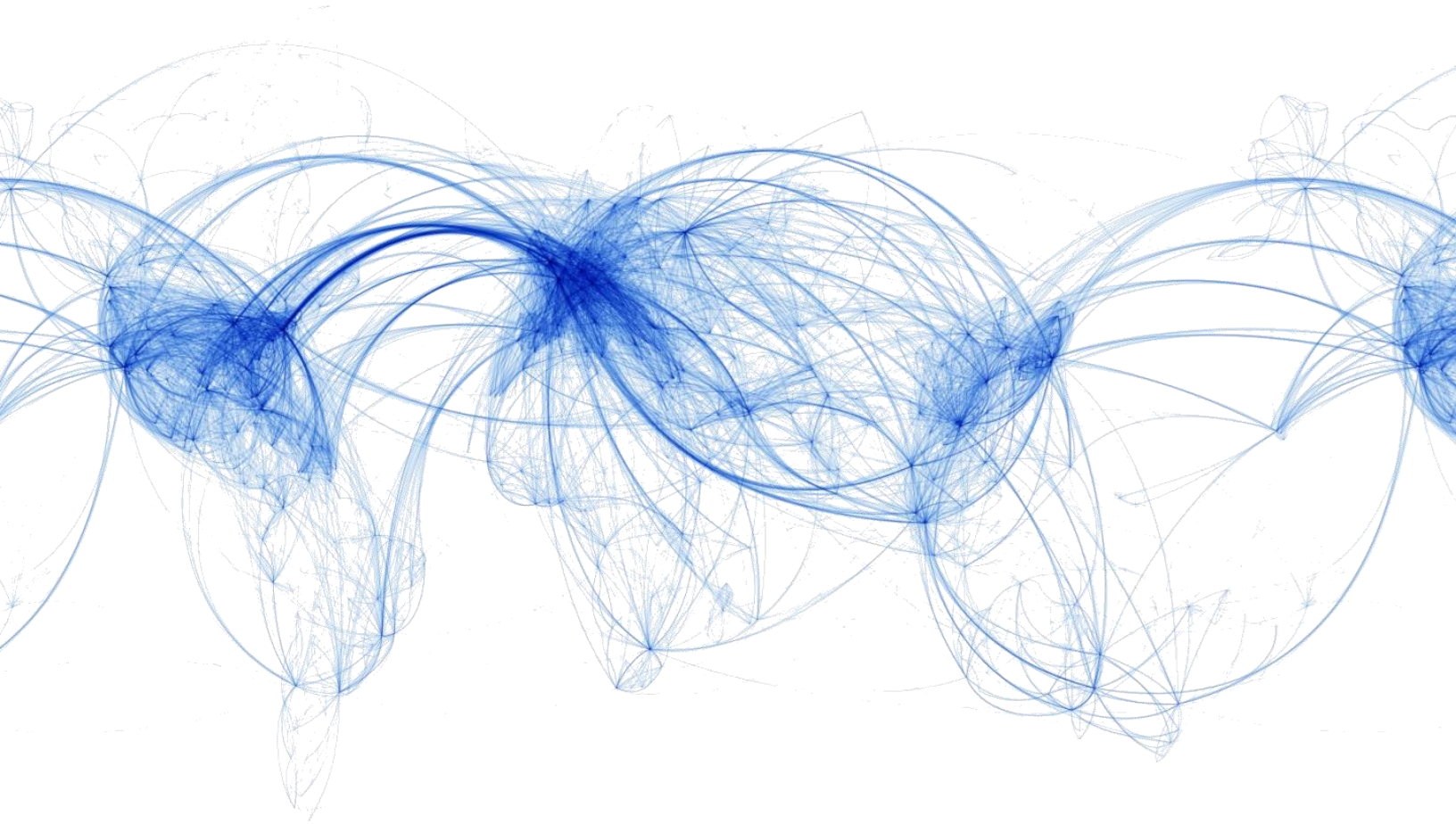
LAC está entrando en una fase decisiva en el desarrollo de los mercados nacionales y regionales de carbono, con implicaciones directas para el sector de la aviación. La creciente demanda de créditos de carbono de alta calidad ha generado una presión cada vez mayor sobre la oferta limitada de créditos elegibles para el CORSIA, impulsada por los compromisos de las contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC), los nuevos regímenes de cumplimiento, como los impuestos sobre el carbono y los sistemas de comercio, y la competencia de otros sectores, como la industria marítima. Al mismo tiempo, el VCM está evolucionando hacia estándares de mayor integridad y cuota de créditos de extracción de dióxido de carbono (CDR), que conllevan mayores costos, pero son esenciales para alcanzar los objetivos climáticos a largo plazo. En este contexto, los gobiernos regionales deben fortalecer sus marcos de trabajo regulatorios y de mercado para garantizar el desarrollo continuo de proyectos de créditos de carbono, mientras que ALTA y sus aerolíneas miembros desempeñan un papel activo en garantizar el acceso a los escasos créditos y, además, desarrollar estrategias sólidas de mitigación de carbono.

- 1. Desbloquear créditos optimizando los procesos de LoA y aclarando los derechos de emisión de carbono.** Varios obstáculos regulatorios limitan actualmente la capacidad de la región para ampliar la oferta de crédito. Es de suma importancia destacar que los retrasos en el proceso de emisión de las cartas de autorización por parte de los distintos países impiden la aprobación de proyectos y limitan el pleno cumplimiento de los créditos que, de otro modo, serían elegibles como parte de CORSIA. La priorización y racionalización de este proceso aumentaría inmediatamente la oferta de crédito y garantizaría una mayor consistencia con los compromisos del Acuerdo de París. Es importante destacar que los inventarios nacionales transparentes de carbono pueden permitir a los países cuantificar y monetizar los resultados de la mitigación, atraer inversiones y retener ingresos. Además, es fundamental que la legislación gubernamental aclare las normas sobre tenencia de la tierra, derechos sobre el carbono y las reglas de distribución de beneficios para reducir el riesgo de los inversionistas y salvaguardar la participación de la comunidad. Los marcos de trabajo jurídicos más sólidos que reconocen los derechos de propiedad sobre el carbono aumentan la cartera de proyectos y garantizan una distribución equitativa de los beneficios, al proporcionar derechos de propiedad y uso claros y exigibles sobre los recursos forestales de carbono. Esta claridad reduce las incertidumbres y los riesgos para los inversionistas y los promotores de proyectos, lo que incentiva la puesta en marcha y la expansión de los proyectos de carbono forestal.
- 2. Apoyar mercados de carbono de alta calidad a gran escala.** Los créditos de carbono de alta calidad suelen requerir mayores costos iniciales debido a los rigurosos estándares y los requisitos adicionales. Los

gobiernos regionales pueden ayudar a eliminar las barreras financieras y ampliar los mercados de carbono mediante la adopción de incentivos financieros, como créditos fiscales, bonos verdes y la asignación de ingresos de los impuestos sobre el carbono. Estas medidas mejoran la viabilidad de los proyectos al compensar los impuestos adeudados, movilizan capital privado a gran escala para la inversión favorable en proyectos de créditos de carbono de alta calidad y apoyan explícitamente las iniciativas del mercado del carbono, incluyendo la construcción de capacidades, la asistencia técnica, el MRV, el desarrollo de infraestructuras y los programas de cobeneficios para las comunidades locales. En conjunto, estos mecanismos crean un entorno económico estable que estimula la participación tanto del sector público como del privado y promueve el desarrollo del mercado del carbono.

- 3. Fortalecer los marcos de trabajo de MRV y la innovación.** La expansión de los marcos de trabajo nacionales de MRV es otra área crítica para el desarrollo de los gobiernos latinoamericanos, ya que un seguimiento sólido de las reducciones de emisiones y las eliminaciones de carbono sustenta tanto la integridad medioambiental como la credibilidad internacional de los créditos de carbono. Sin protocolos MRV transparentes y estandarizados, las preocupaciones en torno al ecoblanqueo o *greenwashing*, las líneas base exageradas y la adicionalidad defectuosa pueden socavar el mercado. Para remediar esta situación, los gobiernos pueden ampliar las tecnologías digitales de MRV (D-MRV), utilizando el caso de Guyana como modelo. El Gobierno de Guyana, en colaboración con expertos académicos y técnicos internacionales, ha desarrollado uno de los sistemas D-MRV más avanzados de la región, que integra múltiples formas de imágenes obtenidas por teledetección para realizar un seguimiento de los cambios forestales con una resolución de una hectárea.
- 4. Armonizar los estándares mediante la colaboración regional.** Otra ruta muy prometedora para desarrollar los mercados de carbono es la colaboración entre los gobiernos regionales, ya que la fragmentación en América Latina debilita la eficiencia y la confianza en el mercado, al tiempo que aumenta los costos de transacción. Iniciativas multinacionales como Carbon Pricing in the Americas, la Alianza del Pacífico y el Foro Latinoamericano y Caribeño del Carbono ya han sentado las bases para ello. Ir de planes fragmentados por proyecto a los estándares comunes puede mejorar la integridad medioambiental, limitar las fugas entre fronteras y crear mercados más líquidos y aptos para la inversión gracias a la coherencia de las políticas. Esta alineación también puede favorecer la interoperabilidad entre los sistemas nacionales, mejorar la transparencia y la comparabilidad de los créditos y reducir los costos administrativos y de transacción para los gobiernos, los promotores de proyectos y los compradores. La armonización de metodologías, estándares MRV y salvaguardias para la distribución de beneficios puede ayudar a los países a poner en común recursos, evitar duplicaciones y ampliar el acceso a la demanda internacional (en particular en virtud del artículo 6 del Acuerdo de París). Los intercambios regionales de conocimientos y las plataformas conjuntas también podrían acelerar la construcción de capacidades en países que se incorporan por primera vez al comercio de derechos de emisión o a la regulación voluntaria del mercado.
- 5. Facilitar a las autoridades nacionales la tarea de promover la elegibilidad de las soluciones regionales de mitigación como parte del CORSIA.** Los gobiernos deben fortalecer y empoderar a las autoridades nacionales designadas para que participen de manera más proactiva en los procesos y órganos técnicos de la OACI, con el fin de facilitar que las abundantes soluciones de mitigación de la región, incluidas REDD+, AFOLU y soluciones más amplias basadas en la naturaleza, puedan ser reconocidas como parte de CORSIA con las salvaguardias ambientales y sociales adecuadas. La mejora de la capacidad técnica y la coordinación de la participación regional pueden ayudar a armonizar las metodologías, los marcos de trabajo de salvaguardia y los procesos de autorización con los requisitos de CORSIA, lo que permitiría desbloquear el acceso a la demanda de la aviación internacional y, al mismo tiempo, preservar la integridad medioambiental y los intereses nacionales.

7 ¿Por qué es necesario un enfoque regional para LAC?



Resultados claves:

- Los marcos de trabajo globales de emisiones netas cero no son adecuados para aplicarse en LAC, ya que la región se enfrenta a condiciones únicas.
- Establecer una trayectoria regional unificada es complejo debido a las diferencias sustanciales entre los países. Una gama de posibles trayectorias ofrece opciones que reflejan mejor las circunstancias nacionales a los gobiernos y a los grupos de interés.
- Todas las rutas hacia las emisiones netas cero tienen importantes implicaciones económicas, lo que destaca la necesidad de un apoyo coordinado por parte de los gobiernos nacionales para mitigar los costos y salvaguardar la conectividad.

7.1 Alcance y metodología

7.1.1 Alcance

El análisis presentado en esta sección combina todos los elementos descritos en el informe, incluyendo la actividad del tráfico, las mejoras en la flota, las mejoras en la eficiencia operativa y la disponibilidad y el precio de SAF y los créditos de carbono. Estos elementos se combinan para modelar hojas de ruta específicas para cada país con el objetivo de alcanzar las emisiones netas cero, basadas en diferentes escenarios, que luego se agregan a nivel regional. Cada opción alcanza el objetivo de emisiones netas cero para 2050, lo que refleja la ambición de ALTA y sus miembros. Todos los aportes siguen las rigurosas metodologías descritas a lo largo de este informe, y las opciones e impactos descritos en este capítulo incorporan una amplia participación de los grupos de interés para garantizar la alineación con las realidades de LAC.

7.1.2 Metodología

El modelo de escenario creado para este estudio asigna medidas de abatimiento para cada país en todos los años comprendidos entre 2025 y 2050 con el fin de cumplir los objetivos de reducción de emisiones y los porcentajes de mezcla de SAF, con el objetivo de ilustrar los impactos de las diferentes rutas para la región. Las medidas se asignan en función del menor costo de abatimiento, sujeto a disponibilidad, tal y como se ha establecido en capítulos anteriores. El modelo tiene en cuenta las limitaciones del mundo real y funciona a través de cuatro fases de asignación secuenciales, seguidas de un bucle de retroalimentación que se ajusta a los cambios en la demanda de aviación causados por las medidas de reducción de emisiones.

1. *Tráfico, tecnología y operaciones:* La primera fase calcula las emisiones anuales de la aviación para cada país y aplica mejoras tecnológicas y operacionales para estimar las emisiones restantes y la demanda actualizada de combustible de aviación.
2. *Asignación nacional de SAF:* Cada país recibe suficiente SAF para cumplir la mitad de su objetivo anual de mezcla³⁹¹. Los SAF se asignan en función del menor costo de abatimiento de las combinaciones de materias primas y tecnologías disponibles a nivel local. Las asignaciones en esta primera ejecución del modelo utilizan materias primas nacionales y mantienen o aumentan el uso anualmente, lo que refleja la continuidad de la producción una vez que las instalaciones están operativas.
3. *Asignación regional de SAF:* Los SAF restantes necesarios para alcanzar la mezcla deseada se agregan entre todos los países y se asigna a partir de un fondo común regional de materia prima que queda después de la asignación nacional. Los SAF se asignan en función del menor costo de abatimiento, y las cuotas se distribuyen proporcionalmente a los requisitos de los SAF no cumplidos por cada país. El

³⁹¹ Un umbral del 50 % equilibra la seguridad energética nacional con la integración regional, lo que permite a los países mantener el control sobre el suministro de SAF y, al mismo tiempo, beneficiarse de la optimización regional.

crecimiento de la producción debe mantenerse estable o constante para cada ruta de tecnología de materia prima.

4. *Reducción del abatimiento de las emisiones:* Tras las asignaciones de SAF, las emisiones restantes se abordan utilizando las opciones disponibles más económicas, normalmente créditos de carbono. Todos proceden de un fondo regional y están sujetos a disponibilidad.
5. *Impacto de la demanda y repetición:* Una vez completadas todas las fases, el modelo evalúa cómo el precio adicional causado por los SAF y los créditos de carbono afecta a la demanda de la aviación. Esto se hace a nivel de cada ruta, incluyendo los flujos de tráfico domésticos, regionales e internacionales con distintos niveles de sensibilidad al precio. Se utiliza el precio medio de SAF por país en LAC, junto con el escenario de adopción de SAF y un precio medio regional de los créditos de carbono. La demanda de SAF en otras regiones se basa en los mandatos y objetivos implementados y anunciados para reflejar los requisitos de abastecimiento de SAF en los vuelos internacionales. Estos cambios actualizan las estimaciones de la demanda de combustible y las emisiones, y el modelo vuelve a ejecutar todas las fases de asignación para refinar las distribuciones de SAF y abatimiento, garantizando que el resultado final refleje las realidades económicas de alcanzar el objetivo de emisiones netas cero.

7.2 Puntos de referencia globales

Las iniciativas de reducción de emisiones de la aviación están avanzando en todo el mundo, pero las estrategias deben reflejar las circunstancias regionales. Si bien el objetivo global de emisiones netas cero es común, las rutas para alcanzarlo difieren debido a las variaciones en los recursos, la infraestructura y las condiciones económicas.

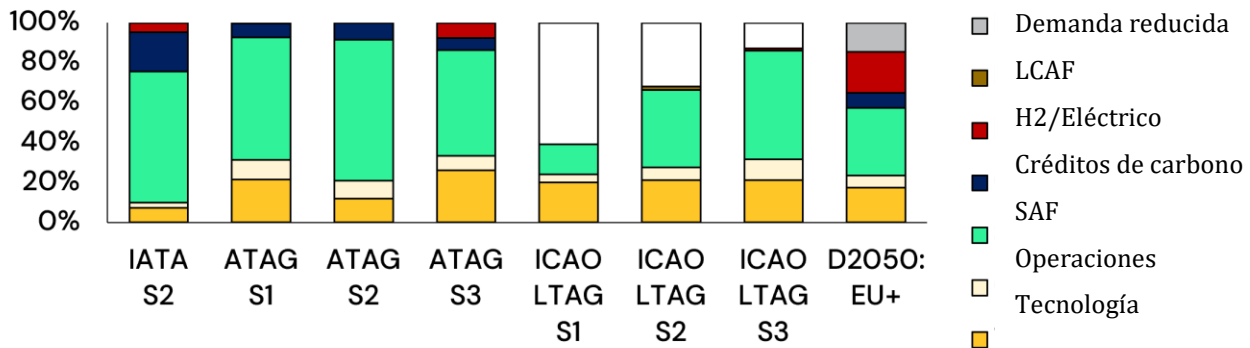
LAC ofrece oportunidades y retos únicos. Cuenta con abundantes recursos naturales, lo que permite compensaciones basadas en la naturaleza, y cuenta con una importante disponibilidad de materias primas y acceso a energías renovables relativamente económicas. Sin embargo, como economía emergente, la conectividad regional es vital para el crecimiento, y muchas zonas de la región dependen de la aviación para su conectividad básica, al no existir sustitutos confiables. La aviación también contribuye de manera significativa al empleo y al valor económico. Cualquier aumento en los costos del transporte aéreo tendrá un impacto mayor en la demanda en comparación con las regiones desarrolladas. Otras limitaciones regionales incluyen el acceso limitado al capital privado, marcos de trabajo regulatorios menos maduros y diferencias en los conocimientos técnicos.

Por el contrario, Europa y Norteamérica cuentan con mercados de aviación consolidados, mayor capacidad de inversión y un apoyo gubernamental más sólido a las políticas climáticas. Estas ventajas permiten el desarrollo de tecnologías avanzadas, estrategias progresivas de reducción de emisiones y estructuras regulatorias sólidas que facilitan la integración de SAF y el desarrollo del mercado del carbono.

Las hojas de ruta del sector difieren en cuanto a las expectativas de desarrollo tecnológico, incluyendo las aeronaves eléctricas y de hidrógeno, las técnicas operativas, como los vuelos en formación, y los avances en materia de SAF, que influyen en el costo en comparación con el combustible convencional. Algunas hojas de ruta excluyen el impacto de las medidas de abatimiento en la demanda, y otras no alcanzan el objetivo de emisiones netas cero. La siguiente figura ilustra las diferencias entre varias hojas de ruta del sector.

Las hojas de ruta de la industria varían en cuanto a estrategias de abatimiento

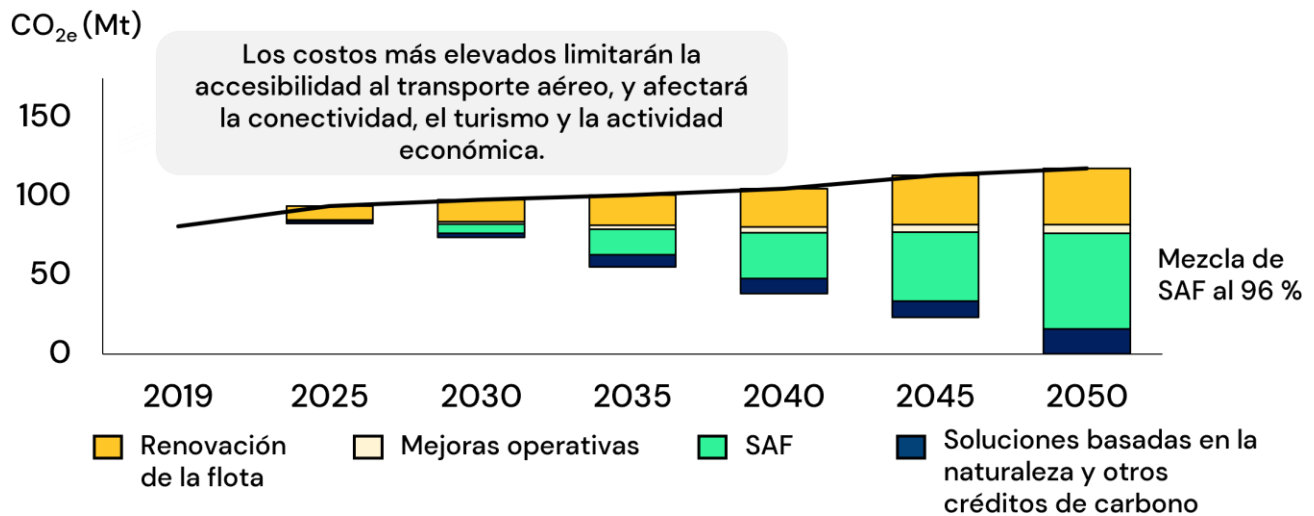
% de abatimiento en 2050



Fuente: IATA.

Entre los escenarios globales más intensivos en SAF se encuentra el LTAG S3 de la OACI, que tiene como objetivo una mezcla de SAF al 96 % para 2050, como parte de su énfasis en la mitigación dentro del sector y la minimización de las emisiones residuales. Para lograrlo a nivel global se requiere un rápido escalonamiento de la tecnología, una importante inversión de capital, cadenas de suministro sólidas y flujos comerciales abiertos. En la siguiente figura se ilustra un caso de mezcla de SAF al 96 % aplicado a la región LAC, lo que tendría implicaciones para la conectividad, el turismo y la actividad económica, especialmente en zonas donde la aviación es la única opción de transporte viable.

Escenario hipotético (alineado con el % de mezcla de LTAG S3 de la OACI) y por qué este apunta a la necesidad de un enfoque diferente para la región



Fuente: análisis de ICF.

Sin embargo, alcanzar una mezcla de SAF al 96 % en LAC plantea muchos retos, entre ellos una inversión de capital considerable, la construcción y el rápido escalonamiento de las instalaciones de producción de SAF en toda la región y el desarrollo de cadenas de suministro intrarregionales eficientes para garantizar una disponibilidad constante de combustible. Los costos aumentarían significativamente. Sin un apoyo económico sustancial, las aerolíneas tendrían que trasladar estos gastos a los consumidores, lo que provocaría un aumento del precio de los tiquetes aéreos y una reducción de la demanda de alrededor del 30 % en 2050.

La pérdida potencial en valor económico de la aviación se estima en aproximadamente 156 000 millones de dólares en este escenario³⁹². Los responsables de las políticas y los grupos de interés del sector deben sopesar estos impactos a la hora de diseñar estrategias de reducción de emisiones para preservar la conectividad y la resiliencia económica, al tiempo que se avanza hacia los objetivos de emisiones netas cero. **Los objetivos globales, tales como la mezcla de SAF al 96 %, no son realistas para el contexto económico y social de la región. Más bien, los enfoques deben adaptarse para preservar la conectividad regional y reforzar el desarrollo económico, sin dejar de apoyar el progreso hacia los objetivos de emisiones netas cero.**

7.3 Escenarios para LAC

7.3.1 Resultados

Alcanzar el objetivo de emisiones netas cero en LAC supondrá costos significativos, independientemente de la ruta que se elija. Existen múltiples opciones para avanzar, y cada una de ellas requiere un análisis minucioso de las realidades económicas y operativas. La renovación de flota y las mejoras operativas han reducido históricamente las emisiones y siguen siendo prometedoras, especialmente con el apoyo de los gobiernos. La renovación de flota podría reducir el consumo de combustible y las emisiones de CO₂ en un 30 % anual para 2050, mientras que las mejoras operativas podrían añadir entre un 3,3 % y un 11,3 % adicional, dependiendo del nivel de apoyo (6,8 % en el escenario de ambición media). Si bien estas medidas reducen los costos de combustible, requieren una inversión considerable y la colaboración de todos los grupos de interés.

Sin embargo, estas estrategias por sí solas no pueden lograr el objetivo de emisiones netas cero. Los SAF y los créditos de carbono son esenciales para abordar las emisiones residuales, y ambos implican costos que no pueden recuperarse mediante el ahorro de combustible. La región abarca países con distintos niveles de actividad económica, enfoque gubernamental y desarrollo tecnológico, lo que dificulta la adopción de un enfoque uniforme. Por lo tanto, este análisis presenta una serie de opciones que permiten a los gobiernos y a los grupos de interés establecer objetivos específicos. Todos los escenarios requieren apoyo financiero para que las aerolíneas compensen los costos de SAF y los créditos de carbono, o el sector se enfrentará a graves repercusiones económicas si se quieren alcanzar los objetivos de sostenibilidad.

La siguiente figura presenta el impacto anual sobre la demanda que se derivaría de alcanzar el objetivo de emisiones netas cero en 2050 con niveles de mezcla de SAF que oscilan entre el 20 % y el 50 %, junto con el nivel correspondiente de apoyo necesario para mitigar estos impactos. En un escenario con una mezcla de SAF al 20 %, las emisiones residuales deberán compensarse mediante la adquisición de créditos de carbono, incluidas las eliminaciones de carbono artificiales. En este escenario, los costos totales para las aerolíneas se estiman en 30 500 millones de dólares, o 224 000 millones de dólares en total, y se prevé una reducción de la demanda de aproximadamente el 19,5 % en caso de ausencia de apoyo financiero. Si bien este enfoque reduce los requisitos de capital inmediatos para la infraestructura de producción de SAF, ejerce presión sobre los mercados de créditos de carbono y supone la disponibilidad de tecnologías de eliminación de carbono a gran escala.

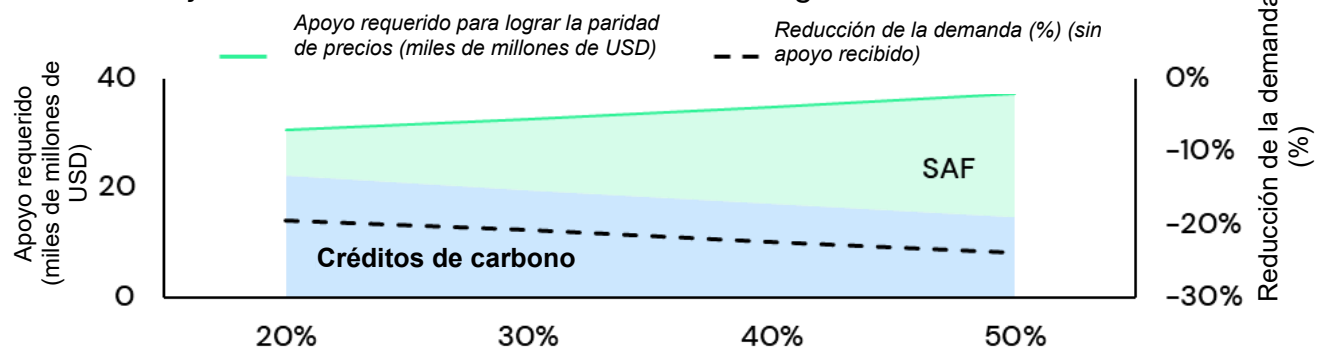
Es importante mencionar que un escenario con una mezcla de SAF al 100 % implica la sustitución completa del combustible convencional para aviones por SAF. Esto requiere una inversión considerable en capacidad de producción de SAF, cadenas de suministro de materias primas e infraestructura de apoyo. El costo para las aerolíneas es considerable, con un gasto total estimado de 50 400 millones de dólares en 2050 y 518 000 millones de dólares en total, y una reducción de la demanda prevista del 31,4 % sin apoyo. Incluso con la adopción total de SAF, los créditos de carbono siguen siendo necesarios, ya que se estima que la reducción media de GEI de SAF en 2050 será del 82 %, lo que deja emisiones residuales que deben abordarse para alcanzar el objetivo de emisiones netas cero. Los impactos de cada escenario de mezcla de SAF, incluidas las implicaciones en la demanda y los impactos económicos, se resumen en las siguientes figura y tabla. Una

³⁹² Incluidas las contribuciones directas, indirectas, inducidas y relacionadas con el turismo.

mezcla con 50 % de mezcla de SAF, por ejemplo, sigue requiriendo una gran inversión y puede dar lugar a una reducción media de la demanda de transporte aéreo del 24 %.

Nivel de apoyo de los gobiernos e inversiones requeridos y reducción de la demanda para la combinación de mecanismos de SAF y carbono en 2050

Apoyo requerido en miles de millones de USD (izq.) y reducción de la demanda en % (der.). El eje horizontal muestra la mezcla de SAF regional en 2050.



Fuente: Análisis de ICF

Tabla59: Impacto de la demanda y costo de las medidas de reducción de emisiones (anual en 2050)

Mezcla de SAF (2050)	20%	30%	40%	50%
Créditos de carbono necesarios (Mt CO ₂ /año)	92,4	83,4	74,1	64,9
Costo de los créditos de carbono (miles de millones de dólares al año)	22,2	19,7	17,2	14,6
Costo de la prima de SAF (miles de millones de dólares al año)	8,3	12,9	17,8	22,7
Costo total (miles de millones de dólares al año)	30,5	32,6	34,9	37,3
Impacto en la reducción de la demanda (%/año) ³⁹³	-19,5	-20,7	-22,4	-24,0

La siguiente tabla presenta el número acumulado de pasajeros no transportados entre 2030 y 2050 en estos escenarios, junto con el nivel de apoyo necesario para mitigar este impacto.

Tabla60: Impacto de la demanda y costo de las medidas de reducción de emisiones (acumulativo 2030-2050)

Mezcla de SAF (2050)	20%	30%	40%	50%
Pasajeros no transportados (millones) ³⁹⁴	1.287	1.385	1.526	1.681
Apoyo necesario (miles de millones de dólares)	224	242	262	284

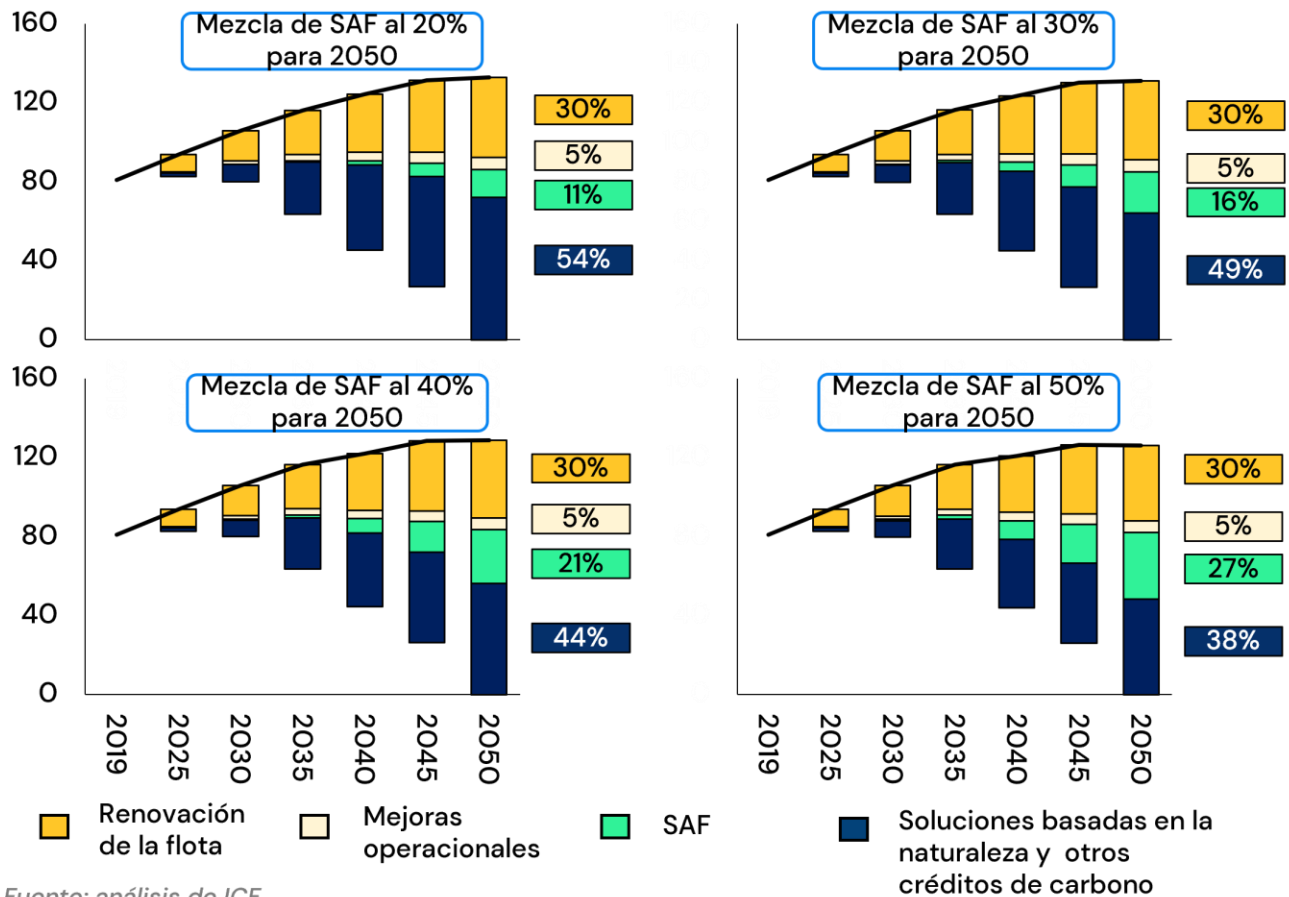
Una mezcla de SAF de entre el 20 % y el 50 % para 2050, complementada con créditos de carbono, podría representar una ruta viable para LAC. Con el apoyo adecuado, este rango equilibra la viabilidad económica, los requisitos de infraestructura y el impacto de la demanda, al tiempo que respalda el progreso hacia el objetivo de emisiones netas cero. La siguiente figura ilustra la contribución de cada medida para alcanzar el objetivo de emisiones netas cero dentro de este rango de mezcla del 20 al 50 %.

³⁹³ Medido en reducción de asientos embarcados.

³⁹⁴ Medido en número de asientos embarcados.

Rutas ilustrativas de descarbonización en el sector de la aviación de LAC para lograr emisiones netas cero en 2050

Millones de toneladas de CO_{2e}



Fuente: análisis de ICF.

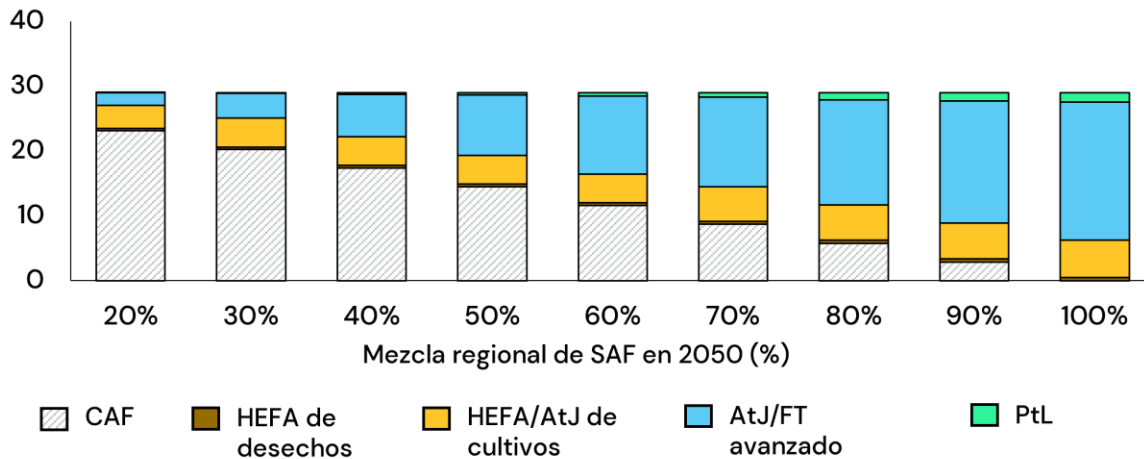
7.3.2 Discusión

7.3.2.1 Mezcla regional de combustible de aviación y costo de abatimiento por mezcla de SAF

La combinación de rutas tecnológicas de materias primas de SAF utilizadas para cumplir cada requisito de mezcla depende tanto del costo de abatimiento como de la disponibilidad de materias primas. En niveles de mezcla más bajos, predominan los SAF derivados de cultivos, principalmente del etanol de caña de azúcar, debido a su costo de abatimiento relativamente bajo y a la previsión de un aumento de su disponibilidad. A medida que la oferta se reduce o cuando los países deben cumplir parte del objetivo de mezcla utilizando materias primas de origen nacional, se hacen necesarias opciones más avanzadas. En estas condiciones, se incorporan a la mezcla volúmenes significativos de los SAF de AtJ producidos a partir de residuos forestales y agrícolas. Aunque el PtL sigue siendo más costoso que el AtJ basado en residuos a lo largo de este estudio, surgen pequeñas cantidades en países con opciones limitadas basadas en residuos. La siguiente figura destaca la combinación de combustibles para aviones de la región en 2050 según el escenario de mezcla de SAF.

Los incrementos en adopción de SAF se cumplen principalmente con los SAF de AtJ avanzado

Suministro de combustible para aviones por tipo en 2050 (Mt)



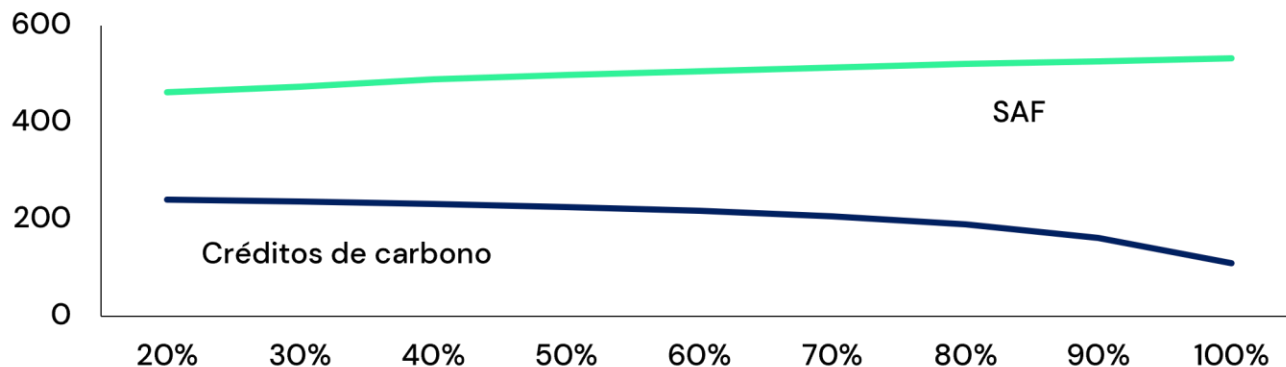
Fuente: análisis de ICF.

A medida que aumenta la dependencia de los SAF de mayor costo, el costo medio ponderado de abatimiento aumenta con el requisito de mezcla. Desde la perspectiva de las aerolíneas, se prevé que el precio por galón de SAF alcance los 6,08 dólares en 2050 con una mezcla de SAF al 20 %, los 6,47 dólares con una mezcla al 50 % y los 6,77 dólares con una mezcla al 100 %. Estas medias ocultan variaciones sustanciales entre países, impulsadas por la disponibilidad de materias primas y las condiciones económicas. Por ejemplo, con un requisito de mezcla al 50 %, se espera que los precios de SAF en Bahamas superen a los de Brasil en más de un 20 % en 2050, principalmente como consecuencia de las limitaciones de las materias primas.

Los costos de créditos de carbono siguen un patrón opuesto. A medida que disminuyen los requisitos de mezcla de SAF, aumenta el volumen de créditos de carbono necesarias y se dispara su precio. Esto se debe al endurecimiento de la oferta de créditos y de las eliminaciones basadas en la naturaleza, lo que obliga a depender en mayor medida de las eliminaciones artificiales, más inmaduras y costosas. En la siguiente figura se presentan los costos medios ponderados de abatimiento para SAF y de los créditos de carbono en distintos niveles de mezcla de SAF, que van desde el 20 % hasta el 100 %, en 2050.

El costo de reducción tanto de SAF como de los créditos de carbono aumenta con su uso, a medida que las opciones más económicas se agotan y se necesitan unas más costosas

Costo de reducción ponderado por uso de SAF en 2050 en USD por tCO_{2e}



Fuente: análisis de ICF.

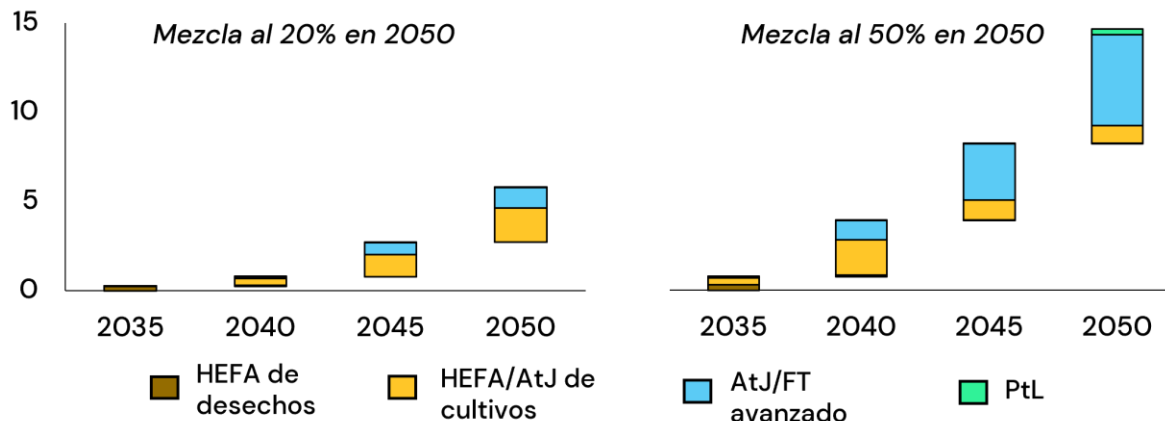
Nota: el costo de reducción de SAF está basado en la prima de SAF.

7.3.2.2 La evolución de la mezcla de SAF y el costo de abatimiento a lo largo del tiempo

La mezcla de SAF también evoluciona significativamente con el tiempo. En todos los escenarios destacados, los volúmenes iniciales están dominados por el proceso HEFA derivado de desechos, principalmente del UCO, debido a su bajo costo de abatimiento y su disponibilidad inmediata. Sin embargo, el suministro del UCO es limitado en LAC, y el crecimiento más allá de los volúmenes iniciales se ve restringido. A medida que la demanda de los SAF supera la oferta basada en UCO, los SAF de AtJ derivado del etanol de caña de azúcar comienzan a incorporarse a la mezcla, lo que representa la siguiente opción con menor costo de abatimiento y una escalabilidad sustancial. A diferencia de los SAF basados en el proceso HEFA, que se basa en residuos, el AtJ derivado de cultivos sigue creciendo de manera constante con el tiempo. Este crecimiento se ve respaldado por el aumento de la producción de etanol de caña de azúcar y la capacidad de los países con un suministro interno limitado para importar de aquellos con capacidad excedentaria. En los últimos años, los SAF basados en residuos se han convertido en un factor determinante, cubriendo las necesidades residuales a medida que maduran y se amplían las rutas tecnológicas más avanzadas para la obtención de materias primas. Esta progresión refleja la realidad global, en la que es poco probable que las tecnologías avanzadas de SAF logren una implementación inmediata a gran escala.

Probablemente el HEFA de desechos y el AtJ/FT de cultivos sean las rutas dominantes en la década de 2040 según el rango examinado de objetivos de mezcla

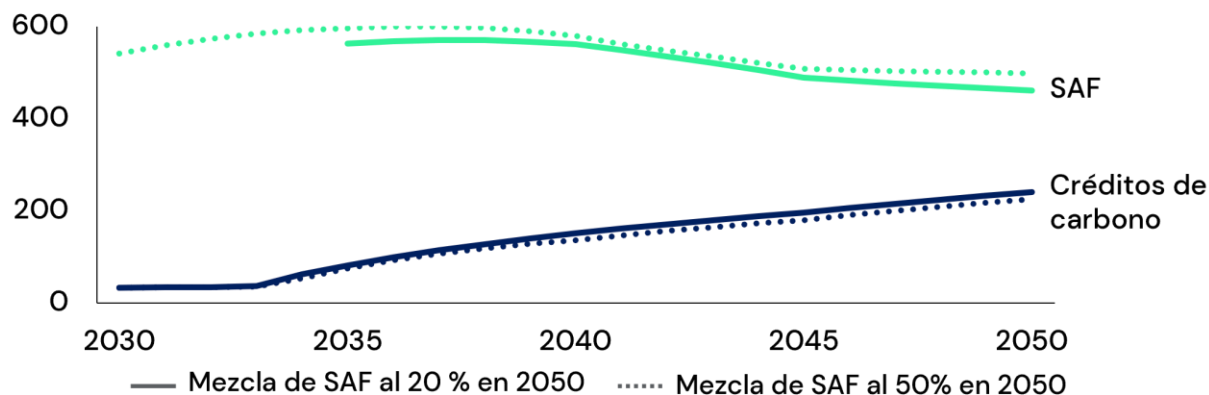
Suministro progresivo de SAF por tipo (Mt)



Fuente: análisis de ICF.

La trayectoria del costo medio de abatimiento de las emisiones de SAF aumenta inicialmente a medida que se agotan las opciones tecnológicas de materias primas de bajo costo y se pasa a depender de tecnologías más caras. Sin embargo, a medida que estas tecnologías maduran, la eficiencia de la producción mejora, la logística se optimiza y la intensidad de carbono de SAF disminuye, el costo de abatimiento de las rutas avanzadas disminuye en los últimos años. Por el contrario, se espera que el costo de abatimiento de los créditos de carbono aumente de forma constante con el tiempo. Esta tendencia está impulsada por la escasez de la oferta y el aumento de la demanda, lo que hace necesario el uso de métodos de eliminación artificiales más costosos para cumplir los objetivos de emisiones residuales.

Aunque los costos de reducción de SAF son más altos que los de los créditos de carbono, la brecha se reduce con el tiempo



Fuente: análisis de ICF. La línea sólida representa un escenario con una mezcla de SAF al 20% en 2050, la línea punteada representa una mezcla al 50%.

7.3.2.3 El impacto de las mejoras en la eficiencia operacional

Para 2050, las mejoras en la eficiencia operacional podrían reducir las emisiones anuales de la aviación en LAC entre un 3,3 % y un 11,3 %. Si bien en este capítulo se aplica una estimación media del 6,8 %, los resultados reales podrían ser considerablemente inferiores o superiores, dependiendo de la ambición de los grupos de interés, la alineación regulatoria y el ritmo del desarrollo tecnológico. La diferencia entre las trayectorias de mejora baja y alta corresponde a 9,4 Mt CO₂e anuales para 2050. Sin estas mejoras, las aerolíneas tendrían que depender en mayor medida de medidas que no generan ahorro de combustible, concretamente un mayor consumo de SAF y una mayor compra de créditos de carbono, para compensar el déficit cada año.

En un escenario con una mezcla de SAF al 50 %, la diferencia entre SAF y los créditos de carbono necesarios para lograr una mejora operativa del 11,3 % en lugar del 3,3 % supondría un ahorro anual de 3600 millones de dólares para 2050, lo que destaca que la eficiencia operativa es un elemento fundamental de cualquier ruta hacia las emisiones netas cero y no puede considerarse opcional. Para aprovechar este potencial, es necesario que los gobiernos, los organismos reguladores, las aerolíneas, los aeropuertos, los proveedores de servicios de navegación aérea y los proveedores de tecnología trabajen juntos bajo unas regulaciones claras, con incentivos alineados, inversiones focalizadas y un compromiso compartido con la colaboración y la transparencia de los datos. Para que esto sea posible en la práctica, la región necesita armonizar los procedimientos, mejorar la infraestructura física y digital, adoptar tecnologías eficaces y crear una cultura en la que la eficiencia operacional se considere una responsabilidad compartida. Sin estas bases, el progreso seguirá siendo desigual y la región se enfrentará a una mayor dependencia de SAF y los créditos de carbono. Cuando estos elementos se combinan, la eficiencia operacional puede reducir los costos de combustible de las aerolíneas, fortalecer las operaciones diarias y reducir el impacto general de alcanzar el objetivo de emisiones netas cero.

7.3.2.4 El impacto de la reducción del riesgo de SAF

El desarrollo tecnológico global será uno de los factores más decisivos a la hora de determinar el costo, la viabilidad y las repercusiones de alcanzar el objetivo de emisiones netas cero en LAC. Si bien los escenarios de mezcla de SAF presentados anteriormente suponen una trayectoria de precios intermedia con descensos moderados de los costos de abatimiento a lo largo del tiempo, los resultados reales dependerán de la rapidez con la que maduren las tecnologías avanzadas y de la eficacia con la que se aprovechen las curvas de aprendizaje globales.

Si la adopción de SAF alcanza el 50 % del consumo total de combustible de aviación en 2050, las economías de escala y la implementación acelerada de la tecnología podrían generar reducciones de costos mucho mayores que las previstas en los escenarios de línea base. A medida que las instalaciones de producción aumenten y las cadenas de suministro se vuelvan más eficientes, los requisitos de gasto de capital disminuirán, las condiciones de financiación mejorarán y los costos operativos se reducirán. Por el contrario, si el desarrollo de los combustibles alternativos sostenibles se retrasa, los costos para las aerolíneas podrían aumentar. Para ilustrar esto, se desarrolló un escenario en el que se asumió una tecnología más rápida y mejoras en los costos, en el que los gastos de capital disminuyen en un 20 %, las tasas de interés de la deuda y el capital en un 15 %, y las tasas de impuestos corporativos, las materias primas y los servicios públicos en un 10 % en relación con la línea base. Un escenario que asume mejoras tecnológicas y de costos más lentas aplica los cambios opuestos, lo que destaca la sensibilidad de los costos a las condiciones tecnológicas y financieras globales. Según el escenario utilizado en este estudio, el costo medio de abatimiento de SAF en 2050 se reduce a aproximadamente 498 dólares por tonelada de CO₂e. Según los escenarios de mejora más rápida y lenta, esto podría oscilar entre 450 y 550 dólares, con una diferencia de costo anual correspondiente para las aerolíneas de 4700 millones de dólares con una mezcla al 50 %. Estos rangos refuerzan el papel fundamental del desarrollo tecnológico global en la mitigación de las presiones económicas sobre el sector.

Para lograr estas reducciones será necesario actuar de forma coordinada en múltiples frentes. Los gobiernos deben crear entornos propicios que atraigan la inversión y aceleren la innovación. Las asociaciones público-privadas serán esenciales para compartir riesgos y movilizar capital para instalaciones de demostración que validen nuevas tecnologías y aceleren la comercialización. La colaboración internacional también es

fundamental para armonizar los estándares, facilitar los flujos comerciales abiertos de materias primas y SAF y garantizar que las economías emergentes se beneficien del progreso global en lugar de quedarse atrás.

El impacto del desarrollo tecnológico global va más allá de la reducción de costos. Refuerza la resiliencia de las estrategias de reducción de emisiones ya que permite flexibilidad en el abastecimiento de materias primas, mejorar la eficiencia de la producción y reducir la dependencia en los créditos de carbono. También impulsa mejoras operacionales que pueden generar ahorros de miles de millones y reducir el impacto de la demanda. Para LAC, aprovechar estos avances mediante políticas proactivas, inversiones en instalaciones de demostración y cooperación regional será esencial para alcanzar los objetivos de emisiones netas cero, al tiempo que se salvaguarda la conectividad y el crecimiento económico. Sin estas medidas, la región corre el riesgo de incurrir en mayores costos, reducir la accesibilidad y ralentizar el progreso hacia la sostenibilidad.

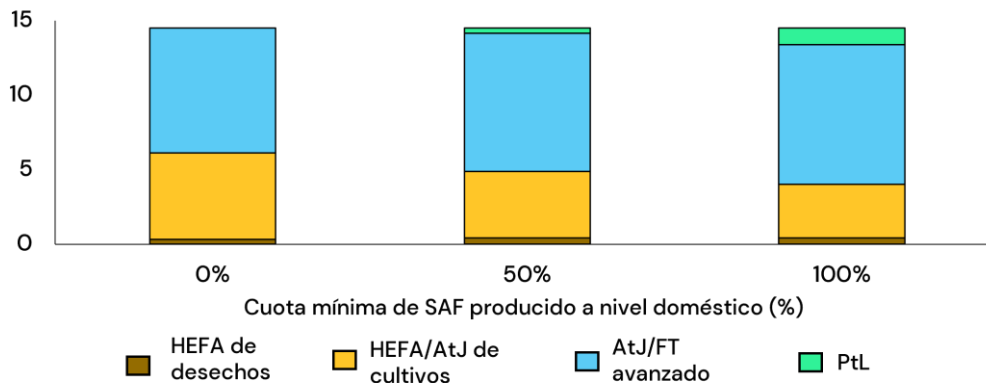
7.3.2.5 El equilibrio entre la integración regional y el logro de los beneficios nacionales de SAF

Dada la gran variación en los costos de producción de SAF y la disponibilidad de materias primas en los países de LAC, es importante equilibrar los beneficios potenciales para cada país con las oportunidades que ofrece la integración regional para reducir los costos y mejorar la resiliencia general del suministro. Una consideración importante es la seguridad energética, que en este contexto se refiere a garantizar que cada país tenga un acceso confiable a SAF sin depender excesivamente de las importaciones ni ser vulnerable a las interrupciones del suministro. La producción nacional puede aportar valor económico mediante la creación de puestos de trabajo, el estímulo de la inversión y la reducción de la exposición a la volatilidad de los precios globales, mientras que los enfoques regionales pueden mejorar la eficiencia, distribuir el riesgo y contribuir a una mayor estabilidad del mercado. En conjunto, un enfoque equilibrado puede ayudar a los países a reforzar su resiliencia frente a los riesgos geopolíticos y a mantener la competitividad a largo plazo en el sector de la aviación.

La siguiente figura ilustra las diferencias entre los escenarios en los que el mínimo nacional de SAF, es decir la cuota de SAF que debe obtenerse localmente para cumplir el objetivo de mezcla al 50 % en 2050, se fija en el 0 % frente al 100 %. En el escenario sin mínimo nacional, los SAF derivados del etanol de caña de azúcar, los gases residuales industriales y los residuos forestales obtenidos a través de AtJ se utilizan plenamente en toda la región, ya que estas materias primas ofrecen los menores costos de abatimiento para 2050. Sin embargo, los gases residuales industriales tienen una disponibilidad limitada, por lo que el etanol de caña de azúcar y los residuos forestales, junto con el AtJ de etanol de maíz, dominan el uso regional de SAF en este escenario. En este caso no se utilizan SAF del PtL porque su costo de abatimiento sigue siendo más elevado que el de todas las demás opciones.

Una plena integración regional tiene como resultado que los SAF derivados de cultivos reemplacen todo el PtL y algunas rutas avanzadas. Sin embargo, esto podría comprometer la seguridad energética

Suministro de SAF con mezcla al 50% por cuota mínima a nivel doméstico (Mt)



Fuente: análisis de ICF.

Cuando el mínimo nacional se fija en el 100 %, el panorama cambia significativamente. Los residuos forestales y el AtJ de etanol de maíz registran un fuerte descenso en su uso, ya que estos recursos se concentran en países específicos. El AtJ de residuos agrícolas, que se distribuye de manera más uniforme por toda la región, se convierte en la materia prima dominante en 2050. Los países que carecen de suficientes materias primas compatibles con los procesos HEFA o AtJ dependen en gran medida del PtL para satisfacer su demanda de SAF.

Las implicaciones de costos de estos dos escenarios son considerables. Alcanzar el objetivo de emisiones netas cero con una mezcla de SAF al 50 % procedente íntegramente del mercado nacional costaría mucho más, 3800 millones de dólares más en 2050, que en un escenario con plena integración regional. Además, las disparidades entre países se acentúan cuando existe un requisito mínimo nacional. Por ejemplo, el costo medio de abatimiento de emisiones de SAF en Brasil en 2050 es aproximadamente un 33 % inferior a la media regional debido a su abundante suministro de etanol de caña de azúcar, que ofrece el costo de abatimiento más bajo.

Para equilibrar estas consideraciones, este análisis utiliza un mínimo nacional del 50 % que permite a los países evitar una dependencia excesiva de SAF de alto costo, al tiempo que se siguen distribuyendo los beneficios económicos y se apoya la seguridad energética. Según este enfoque, el uso de SAF en toda la región en 2050 se impulsará principalmente en residuos forestales, etanol de caña de azúcar y el AtJ de residuos agrícolas, con contribuciones menores del UCO, grasas animales, gases residuales industriales, RSU y PtL repartidos por diferentes países.

8 Declaración final



El transporte aéreo es una base fundamental para la conectividad y el crecimiento económico en LAC. La extensa geografía de la región y la dispersión de las comunidades hacen que la aviación sea indispensable para la conectividad entre familias y amigos, el comercio, el turismo y el acceso a servicios esenciales. En 2023, el sector contribuyó con el 3,6 % del PIB y sustentó casi el 3 % del empleo. Se espera que la demanda de pasajeros crezca de manera constante hasta 2050.

El sector de la aviación en LAC se ha comprometido a reducir las emisiones. Las aerolíneas de LAC han realizado importantes inversiones y avances para reducir sus emisiones mediante medidas como la renovación de flota y la mejora de la eficiencia operativa. Sin embargo, los objetivos de reducción de emisiones deben equilibrarse con la protección de la asequibilidad y la conectividad. Las medidas contra el cambio climático no pueden adoptarse a expensas de la accesibilidad, ya que el transporte aéreo sigue siendo vital para el crecimiento inclusivo y la competitividad en una región donde las alternativas son limitadas y las distancias son significativas.

La flota es una de las medidas más eficaces para reducir las emisiones y, al mismo tiempo, hacer crecer la economía. Las aeronaves más nuevas ofrecen mejoras notables en cuanto a eficiencia de combustible, costos operativos y desempeño medioambiental, lo que beneficia tanto a las aerolíneas como a los pasajeros. Mantener el impulso en la renovación de flota permitirá a la región seguir reduciendo la intensidad de las emisiones al tiempo que se apoya el crecimiento del tráfico. Las compañías aéreas de LAC ya han realizado importantes inversiones en estrategias de renovación de flota.

La eficiencia operacional representa una medida inmediata y rentable para reducir las emisiones, pero requiere la colaboración de todos los grupos de interés y el apoyo de los gobiernos. La mejora de las operaciones mediante medidas de eficiencia y planificación de las aeronaves, iniciativas aeroportuarias y terrestres, y la optimización del perfil de vuelo ofrecen un ahorro significativo en combustible y emisiones. Para lograr estas mejoras se necesita una acción coordinada por parte de los gobiernos, los proveedores de servicios de navegación aérea y los aeropuertos, así como inversiones en sistemas modernizados y procesos optimizados.

Para alcanzar los objetivos de sostenibilidad sin dejar de garantizar la conectividad, se debe definir un enfoque a la medida para la región. Las rutas globales más ambiciosas son poco realistas para la región. Se requiere un enfoque adaptado a la región para alcanzar los objetivos de sostenibilidad y preservar al mismo tiempo la conectividad, reconociendo el principio de responsabilidad común pero diferenciada del CMNUCC. Las medidas fuera del sector y las estrategias SAF deben reflejar las realidades nacionales, la sensibilidad al precio y la madurez del mercado. La gran dependencia de costosas opciones de abatimiento podría limitar la conectividad en una región donde los pasajeros son muy sensibles a los precios y las alternativas al transporte aéreo son limitadas. Se necesitan rutas pragmáticas que equilibren las medidas dentro del sector con mecanismos de créditos de carbono creíbles y bien regulados, al tiempo que se mantiene la conectividad y la competitividad.

Los SAF son una de las medidas clave dentro del sector con potencial a largo plazo para descarbonizar la aviación, pero hay que superar varias barreras económicas, tecnológicas, políticas y regulatorias. LAC tiene el potencial de convertirse en una parte importante de la industria global de SAF, aprovechando las materias primas locales, creando puestos de trabajo y mejorando la seguridad del suministro de combustible. Sin embargo, en el momento de redactar este informe, la producción en la región es muy escasa, con solo un pequeño volumen de capacidad de coprocesamiento y sin instalaciones independientes. Como reflejo de la fase inicial de desarrollo de la industria de los combustibles sostenibles de aviación en LAC, los precios indicativos también han sido más elevados que en otras regiones. Para escalar la producción se necesitarán políticas de apoyo, inversiones en apoyo a la infraestructura y mecanismos para minimizar el impacto que los precios tienen para los pasajeros. El enfoque regional y la alineación con las necesidades de los mercados de exportación pueden generar la demanda financiable necesaria para alcanzar los objetivos deseados. La integración regional de los marcos de trabajo regulatorios y los estándares de sostenibilidad podrían mejorar aún más la eficiencia del mercado.

En LAC se encuentran varios ecosistemas críticos, por lo que es esencial preservarlos y restaurarlos. La región alberga algunos de los ecosistemas más extensos y críticos del mundo, lo que ofrece oportunidades para compensaciones de alta calidad y soluciones basadas en la naturaleza que aportan beneficios medioambientales y sociales. Los mercados de carbono bien diseñados e integrados a nivel regional pueden canalizar la inversión hacia la conservación, la biodiversidad y el desarrollo comunitario, al tiempo que apoyan la transición más amplia hacia una aviación sostenible.

Lograr la reducción de emisiones de la aviación en LAC requerirá una acción coordinada entre todos los grupos de interés que refleje las realidades regionales. Las mejoras operacionales representan una de las oportunidades más inmediatas y rentables, pero lograr desbloquear estas ganancias depende de una colaboración más estrecha entre gobiernos, ANSP, aeropuertos y aerolíneas. A largo plazo, la reducción de las emisiones deberá sustentarse en un equilibrio entre la introducción gradual de los SAF y el uso de créditos de carbono de alta calidad. Dada la sensibilidad a los costos y la madurez desigual del mercado, estas vías deben calibrarse cuidadosamente para reducir las emisiones sin dejar de preservar la asequibilidad, la conectividad y la competitividad.



Apéndice



Apéndice

Apéndice A: El papel del coprocesamiento

El coprocesamiento es una técnica utilizada en las operaciones de refinería que combina materias primas renovables, como aceites usados, grasas y ciertos tipos de biomasa, con insumos fósiles convencionales para producir combustibles con una menor intensidad de carbono que el combustible estándar para aviones. El enfoque apalanca la infraestructura y la tecnología existentes en las refinerías, lo que permite al sector energético comenzar a descarbonizar el combustible de aviación con modificaciones relativamente modestas en sus instalaciones. Este método permite la integración gradual de material renovable en la mezcla de combustibles, que puede ajustarse en función del suministro de materia prima, la demanda y los requisitos regulatorios. El coprocesamiento ofrece varias ventajas en comparación con las instalaciones independientes de SAF:

1. Al utilizar activos corrientes, las refinerías pueden evitar los importantes gastos de capital que suelen conllevar la construcción de instalaciones dedicadas de SAF, lo que facilita una adopción más rápida y el escalonamiento de la producción.
2. La flexibilidad del coprocesamiento se ve reforzada por su capacidad para adaptarse a una gran variedad de materias primas renovables, lo que permite a las instalaciones responder a la disponibilidad de recursos locales y a las fluctuaciones del mercado. Las materias primas para el coprocesamiento pueden incluir aceites de cocina usados, grasas animales y residuos agrícolas, aunque su idoneidad depende de su composición química y de los requisitos de procesamiento. El proceso contribuye a reducir las emisiones totales de gases de efecto invernadero a lo largo del ciclo de vida.
3. La combinación de insumos renovables y derivados de combustibles fósiles permite a las refinerías optimizar la producción de combustible sin alterar las cadenas de suministro establecidas, lo que convierte al coprocesamiento en una forma pragmática de realizar la transición hacia combustibles de aviación con menos emisiones de carbono.

A pesar de estas ventajas, el coprocesamiento se enfrenta a varias limitaciones:

1. Una de las principales limitaciones es la restricción técnica sobre la proporción de materia prima renovable que se puede incorporar a los flujos de las refinerías. Un contenido excesivo de energías renovables puede afectar el desempeño del catalizador, la integridad del equipo y la calidad del producto, lo que limita la cantidad de combustible fósil que se puede sustituir. Actualmente, el coprocesamiento se limita a una cuota de mezcla al 5 % de materias primas renovables en una refinería de petróleo convencional. Se está trabajando en la evaluación del aumento de la cuota de esta mezcla del 5 % al 30 %, lo que incrementaría aún más el volumen potencial de coprocesamiento. Sin embargo, incluso con este aumento potencial (aún en fase de evaluación), las cantidades de SAF producidas mediante coprocesamiento serán limitadas.
2. A pesar de los menores requisitos de capital y costos de producción, los SAF coprocesados siguen viéndose afectados por la dinámica del mercado y **su precio para las aerolíneas sigue siendo elevado en comparación con el combustible fósil para aviones** (al menos entre tres y cuatro veces más alto en la actualidad).
3. Los requisitos de certificación y trazabilidad introducen una complejidad adicional, ya que es necesario contar con sistemas sólidos para documentar el origen, la proporción de mezcla y los detalles del procesamiento de los insumos renovables a fin de cumplir con los estándares de sostenibilidad y los marcos de trabajo regulatorios. Estas necesidades de seguimiento son especialmente importantes para garantizar que los SAF coprocesados cumplan con las especificaciones internacionales requeridas para su uso en la aviación.
4. El cálculo de las emisiones durante el ciclo de vida es otro reto para el coprocesamiento. La mezcla de diversas fuentes de carbono introduce incertidumbre en la cuantificación de las reducciones netas de emisiones y puede complicar el cumplimiento de las obligaciones de información medioambiental. El impacto global de la sostenibilidad del coprocesamiento está estrechamente relacionado con las características y el origen de las materias primas renovables. **Algunas materias primas, como ciertos tipos de aceites vegetales o biomasa, pueden presentar riesgos indirectos para la sostenibilidad, entre ellos el cambio en el uso del suelo, los impactos sobre la biodiversidad y la competencia por los recursos con otras industrias.**
5. La integración técnica de materiales renovables puede requerir modificaciones en las operaciones de las refinerías, tales como cambios en la selección de catalizadores, ajustes en las condiciones del proceso y prácticas de mantenimiento mejoradas. Estas complejidades operativas pueden generar

costos adicionales y requerir un entrenamiento continuo del personal y el desarrollo de sus competencias.

6. Dado que el coprocesamiento produce un combustible que contiene componentes tanto renovables como fósiles, y que actualmente solo se puede mezclar al 5 %, las reducciones potenciales de emisiones son intrínsecamente limitadas en comparación con las rutas de SAF 100 % renovables. Esto posiciona el coprocesamiento como una solución transitoria, adecuada para reducir la intensidad de carbono a corto plazo, pero poco probable que logre la profunda reducción de emisiones necesaria para cumplir los objetivos climáticos a largo plazo de la aviación.

En general, el coprocesamiento ofrece a las refinerías una ruta para comenzar a producir SAF a gran escala y avanzar gradualmente hacia los objetivos de sostenibilidad. Sus principales fortalezas son la capacidad de utilizar los activos existentes, responder con flexibilidad a los mercados de materias primas y facilitar una transición más fluida de los combustibles fósiles a las alternativas renovables. Este enfoque también favorece la pronta penetración en el mercado de los combustibles sostenibles para SAF y permite a las refinerías hacer frente a las nuevas presiones regulatorias y del mercado para obtener combustibles de aviación con menos emisiones de carbono. Sin embargo, a medida que evolucionan los estándares de la industria y mejoran el suministro y la viabilidad de las materias primas renovables, se espera que las plataformas de producción dedicadas, capaces de generar SAF a partir de insumos 100 % renovables, cobren cada vez más importancia para lograr reducciones generalizadas y a largo plazo de las emisiones de la aviación.

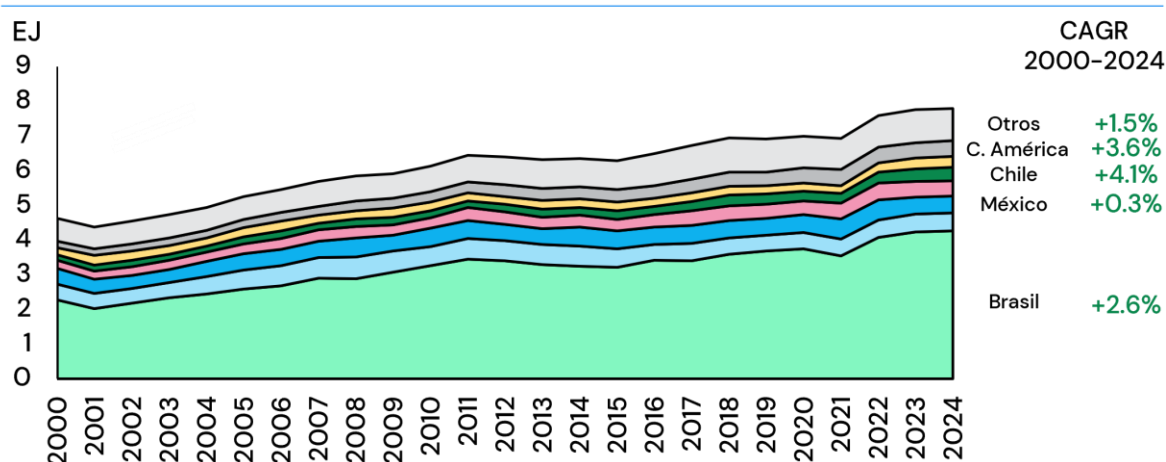
Apéndice B: Panorama de la electricidad renovable y potencial para el PtL en la región

LAC se ha consolidado como líder en energías renovables, con fuentes renovables e hidroeléctricas que representan el 62 % de la generación total de electricidad en 2024³⁹⁵. Esta importante penetración de las energías renovables en la generación de electricidad supera con creces la media global del 32 %, lo que posiciona a la región como un modelo para la transición hacia la energía limpia y sugiere un gran potencial para escalonar el uso de SAF que dependen de la electricidad renovable.

Desde el año 2000, la capacidad renovable de la región ha aumentado a una tasa media anual del 2,9 %, dominada por Brasil. Brasil ha aportado más de la mitad del suministro de energía renovable de la región durante las últimas dos décadas.

En 2024, las energías renovables representaron el 87 % de la generación eléctrica de Brasil, casi tres veces más que la media global del 32 %. Esta elevada cuota de energía renovable indica que Brasil, y posiblemente otros países de la región, podrían desempeñar un papel importante en la viabilidad de las rutas de los SAF de PtL a largo plazo, dada su necesidad de grandes volúmenes de electricidad renovable.

El suministro de energía renovable en LAC ha estado creciendo de manera constante históricamente (2000–2024)



Fuente: Energy Institute, análisis de ICF.

El éxito de Brasil en alcanzar una cuota tan elevada de energías renovables se debe principalmente a su sólida base hidroeléctrica y a la rápida expansión de la energía solar y eólica en los últimos años. La cuota de la energía hidroeléctrica ha fluctuado de un año a otro durante la última década debido a las condiciones climáticas variables, situándose en el 55 % de la electricidad de Brasil en 2024, frente al 63 % de media en 2013³⁹⁶. Mientras tanto, la cuota de energía eólica, solar y otras energías renovables ha crecido rápidamente en los últimos años, alcanzando el 32 % en 2024. Países como Chile y Colombia también han registrado un importante crecimiento desde el año 2000. Estas tendencias destacan el potencial de varios países de LAC para aprovechar su creciente capacidad renovable para la producción de combustibles sostenibles para la aviación en el futuro, tanto para uso doméstico como para proyectos orientados a la exportación.

A pesar de las mejoras en la infraestructura eléctrica y la creciente integración de las energías renovables, el acceso a la electricidad sigue siendo un reto en la región. En 2023, el acceso general a la electricidad se situó en el 97 %, y algunos países alcanzaron casi el 100 %³⁹⁷. Sin embargo,

³⁹⁵ Energy Institute Statistical Review of World Energy, 2025.

³⁹⁶ <https://ember-energy.org/latest-insights/brazil-rises-as-g20-renewables-powerhouse/>

³⁹⁷ <https://www.iea.org/commentaries/bottom-up-energy-transitions-managing-the-rise-of-energy-communities-in-latin-america>

algunas zonas siguen enfrentándose a retos en cuanto a la cobertura y la calidad del servicio, y las zonas rurales y los barrios desfavorecidos suelen tener un acceso poco confiable a la electricidad. Centroamérica y el Caribe, por ejemplo, tienen tasas de acceso a la electricidad por debajo de la media, de alrededor del 92 % y el 83 %, respectivamente, mientras que el crecimiento de la tasa de acceso en toda la región no ha mejorado en la última década.

Las pérdidas en la red eléctrica de la región alcanzan una media del 16 %, frente al 6 % de los países de la OCDE. En 2019, se estimó que los cortes de energía duraban 16 veces más que en la Unión Europea y se producían con una frecuencia diez veces mayor, mientras que las conexiones ilegales generalizadas a la red en las zonas urbanas siguen provocando pérdidas no técnicas. Superar estas limitaciones será esencial para que la electricidad renovable vaya más allá de satisfacer las necesidades básicas y respalde tecnologías transformadoras como los SAF de PtL.

La elevada cuota de electricidad renovable de LAC proporciona una base sólida para la transición energética e indica el potencial para apoyar la futura producción de combustibles sostenibles para la aviación, en particular a través de rutas del PtL que dependen de la electricidad renovable. Esto se ve reforzado por el hecho de que algunos países, como Chile, ya han establecido objetivos ambiciosos en materia de los SAF de PtL, lo que indica el deseo de la región de aprovechar el potencial de la electricidad renovable³⁹⁸. **Para aprovechar este potencial será necesario mejorar continuamente la fiabilidad de la red, diversificar las fuentes renovables y alinear cuidadosamente los avances del sector energético con las nuevas necesidades de producción de combustible.**

³⁹⁸ https://vuelolimpio.cl/wp-content/uploads/2024/10/Chile_SAF_Roadmap_2050_.pdf

Apéndice C: Análisis de elasticidad

Para proyectar el crecimiento del tráfico a largo plazo y evaluar los posibles cambios en la demanda resultantes del aumento del precio de los tiquetes aéreos asociados a las medidas de reducción de carbono, este estudio se basa en estimaciones de elasticidad producidas por la Universidad de San Andrés (UdeSA). El estudio ofrece estimaciones específicas por región sobre cómo responde la demanda de transporte aéreo a los cambios en los precios de los tiquetes aéreos y a los niveles de ingresos.

En el contexto del modelo de la demanda de aviación, hay dos tipos de elasticidades de especial importancia. La elasticidad del precio de la demanda mide cómo reacciona el volumen de pasajeros ante las variaciones en las tarifas aéreas, mientras que la elasticidad ingreso de la demanda refleja cómo evoluciona la demanda de transporte aéreo a medida que crece la actividad económica. Estos parámetros permiten que las previsiones de tráfico incorporen tanto el crecimiento macroeconómico como las posibles reducciones de la demanda derivadas del aumento de los precios de los tiquetes aéreos.

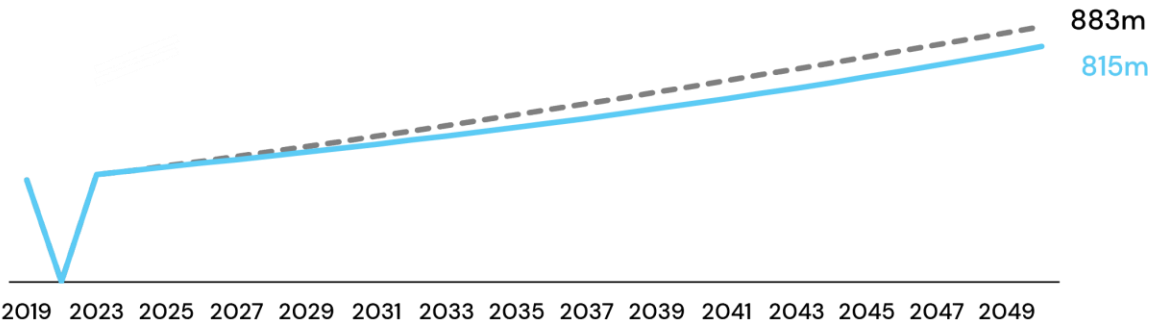
El estudio de la UdeSA estima estas elasticidades mediante un modelo econométrico a nivel de ruta basado en una especificación log-log, lo que permite interpretar los coeficientes estimados directamente como elasticidades. El análisis se lleva a cabo utilizando un conjunto de datos de panel que abarca el período 2014-2024 (excluido 2020) a nivel mensual de rutas origen-destino. Los mercados se definen como combinaciones de pares de aeropuertos y meses, lo que permite al modelo captar tanto las características específicas de cada ruta como las variaciones estacionales de la demanda. El conjunto de datos combina información detallada sobre el transporte aéreo proporcionada por ALTA con información adicional de Cirium y fuentes macroeconómicas internacionales. Las variables claves de la aviación incluyen el volumen de pasajeros, las tarifas medias, los RPK (Pasajeros-Kilometro), los ASK (Asientos-Kilometro Disponibles), la capacidad de asientos, el tipo de aeronave y la participación de pasajeros por punto de origen, agregadas por aerolínea, ruta y mes. Las variables macroeconómicas, como el PIB per cápita y la población se obtienen de la base de datos de las Perspectivas de la economía mundial del FMI para garantizar la comparabilidad entre países.

Dado que las decisiones de las aerolíneas en materia de precios pueden responder a las condiciones de la demanda, el estudio aborda la posible endogeneidad entre las tarifas y el volumen de pasajeros mediante un enfoque de variables instrumentales. En particular, se utilizan los precios del combustible de aviación obtenidos de S&P Global Energy (en interacción con la distancia de la ruta) como instrumentos basados en los costos para aislar las variaciones exógenas de las tarifas que no guardan relación con las fluctuaciones de la demanda a corto plazo. Con el fin de garantizar una estimación robusta, se incorporan controles adicionales, entre los que se incluyen indicadores estacionales, variables macroeconómicas y medidas de la competencia en el mercado.

La estimación arroja tanto elasticidades de precio como elasticidades de ingresos para la región. Para efectos comparativos, este análisis también toma como referencia estimaciones de elasticidad anteriores publicadas por la IATA en un estudio mundial realizado en 2008. Sin embargo, estos valores se utilizan únicamente como punto de referencia indicativo, ya que las estimaciones de la IATA se obtuvieron utilizando una metodología y un conjunto de datos diferentes.

El análisis de elasticidad de los ingresos adaptado a nivel regional da como resultado 7,7% menos pasajeros de salida por año en 2050

Pronóstico de pasajeros de salida de tráfico aéreo (millones por año)

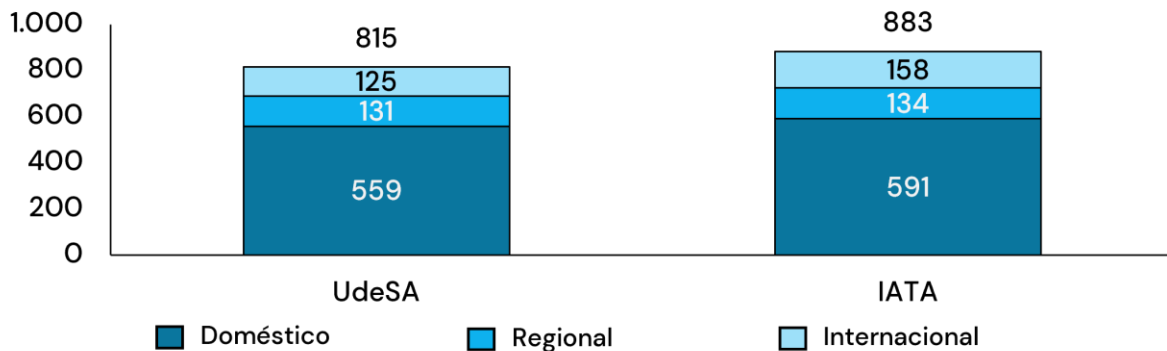


Fuente: IATA, UdeSA, análisis de ICF.

La aplicación de los parámetros de elasticidad de la IATA da como resultado una previsión de nivel de tráfico de aproximadamente 883 millones de pasajeros de salida desde LAC para 2050. El uso de las elasticidades específicas de la región estimadas por la UdeSA arroja una previsión ligeramente inferior, de alrededor de 815 millones de pasajeros de salida, lo que refleja la mayor sensibilidad al precio observada en el análisis econométrico regional.

El tráfico internacional es el más afectado al aplicar la elasticidad de los ingresos adaptado a nivel regional, con una disminución de 21% comparado con los valores de elasticidad global de la IATA

Pasajeros embarcados por segmento (millones por año - 2050)







Fuente: UdeSA, IATA. Análisis de ICF.

Dado que las estimaciones de la UdeSA se basan en un conjunto de datos que abarca específicamente América Latina y el Caribe e incorporan las condiciones de mercado más recientes, se utilizan como datos de elasticidad principales para este estudio.



icf.com

-  twitter.com/ICF
-  linkedin.com/company/icf-international
-  facebook.com/ThisIsICF
-  [#thisisicf](https://instagram.com/thisisicf)

ICF (NASDAQ:ICFI) es una empresa global de consultoría y servicios digitales con más de 9000 empleados de tiempo completo y parcial, pero no somos los típicos consultores. En ICF, los analistas de negocios y los especialistas en políticas trabajan junto con estrategas digitales, científicos de datos y creativos. Combinamos una experiencia sin igual en el sector con capacidades de interacción de vanguardia para ayudar a las organizaciones a resolver sus retos más complejos. Desde 1969, ICF ha colaborado con clientes del sector público y privado para afrontar los cambios y dar forma al futuro. Más información en icf.com.