



Ruta a la Sostenibilidad en América Latina y El Caribe 2024



Resumen Ejecutivo	3
Introducción	
Gráfica 1. Crecimiento relativo (1970=100) de Pasajeros 1970-2023	4
Objetivo	5
Cambio Climático y sus Consecuencias para la Industria Aérea	6
Emisiones de la Industria Aérea y el contexto Latinoamericano	7
Gráfica 2. Emisiones de Aviación como % del Total	8
Gráfica 3. Top 25 por países de Emisiones de Aviación Acumuladas 2013-2023	8
Gráfica 4. Pronóstico de Emisiones de la industria aérea en Latinoamérica (2013-2050)	8
Iniciativas de Descarbonización Recientes en el Sector Aéreo de América Latina y el Caribe	
Gráfica 5. Consumo de Combustible por cada 100RPK	9
Gráfica 6 . Participación de las aerolíneas de ALC en tráfico y emisiones totales (2023 vs. 2013)	9
Estrategias de Descarbonización en la Aviación	10
Costos para alcanzar la Descarbonización	14
Gráfica 7. Costos e Inversiones Globales de Descarbonización	
Impacto en los precios de los boletos aéreos	16
Gráfica 8. Evolución del CASK (costo por asiento-km disponible) y del Yield (ingresos por pasajero-km) de las aerolíneas de ALC, valores ajustados a la inflación.	17
Gráfica 9. Tarifa media como % de PIB per Cápita (PPP, precios \$ de 2021)	17
Gráfica 10. Distribución Porcentual Anual de Sobrecosto total por adopción de SAF	18
Gráfica 11. Comparación de Ingresos por Pasajero Kilometro de acuerdo con Escenarios de Descarbonización	20
Gráfica 12. Rentabilidad Neta por Pasajero	20
Desafíos y Recomendaciones para alcanzar la Descarbonización de la industria y mayor competitividad en los precios del SAF	21

Anexo 1: Estado actual de los Combustibles de Aviación Sostenible (SAF) y perspectivas hacia 2050	25
Gráfica 13. Proyección del suministro de SAF para América Latina (2027-2050)	25
Gráfica 14. Participación por país de la oferta total proyectada de SAF en ALC (2050)	25
Gráfica 15. Suministro de SAF para América Latina por vía de producción, pronóstico (2027- 2050)	26
Gráfica 16. Precios de SAF-HEFA en el mercado de Latinoamérica (2024-2050)	26
Anexo 2: Mercados y mecanismos de reducción de carbono	27
Gráfica 17. Precios diarios para mercado de créditos elegibles para CORSIA	
Anexo 3: Estado del combustible de aviación en la región	28
Demanda total de combustible de aviación de América Latina	
Gráfica 19. Crecimiento promedio anual del consumo de jet fuel por país	29
Gráfica 18. Consumo histórico y pronóstico de jet fuel para principales países en ALC (miles de b/d)	29
Producción de combustible de aviación de América Latina	30
Gráfica 20. Capacidad histórica y pronóstico de producción de combustible aviación por país	
Balance comercial histórico y perspectivas a 2050, por país	31
Gráfica 21. Balance comercial de jet fuel en ALC y pronóstico (2005-2050)	
Gráfica 22. Balance de jet fuel— Brasil	32
Gráfica 23. Balance de jet fuel— México	32
Gráfica 24. Balance de jet fuel— Colombia	32
Gráfica 25. Balance de jet fuel— Chile	32
Gráfica 26 . Balance de jet fuel— Argentina	33
Anexo 4: Renovación de flota y densificación de cabina en la región	
Gráfica 27 . Edad Promedio de Flotas (Aerolíneas ALTA)	34
Gráfica 28. Comparación de Edad Promedio de Flotas (2023)	34
Gráfica 29. Nuevos aviones en servicio en LAC por tipo de avión	34
Gráfica 30. Entregas de Aeronaves Programadas en LAC	35
Gráfica 31. Densificación de Cabinas (Asientos promedio por tipo de avión)	35
Referencias	36

Resumen Ejecutivo

La transición hacia una aviación sostenible en América Latina y el Caribe es un desafío que requiere un enfoque multidisciplinario para reducir las emisiones de CO2 sin comprometer la accesibilidad del transporte aéreo. Este documento describe tanto el estado actual de la aviación en la región como los pasos necesarios y costos asociados para alcanzar los objetivos de descarbonización.

Cambio Climático y Consecuencias para la Industria Aérea: Se examinan los efectos del cambio climático sobre la aviación, como los eventos meteorológicos extremos y su impacto en las operaciones y costos.

Emisiones de la Industria Aérea y el Contexto Latinoamericano: Describe el aporte de la aviación a las emisiones totales de CO2 y se destacan las eficiencias logradas durante los últimos años.

Iniciativas de Descarbonización Recientes: Se mencionan las mejoras operativas y tecnológicas implementadas en América Latina para reducir la intensidad de emisiones, como la renovación de flota.

Costos para alcanzar la Descarbonización: Se detallan los costos proyectados para la transición a una aviación sostenible. Se mencionan inversiones globales y regionales necesarias para la transición.

Impacto en los Precios de los Boletos Aéreos: Analiza cómo los costos adicionales por la adopción de SAF y otras tecnologías pueden impactar las tarifas aéreas.

Desafíos y Recomendaciones: Esta sección ofrece las siguientes recomendaciones esenciales:

- **Fomentar múltiples caminos hacia la descarbonización:** Se enfatiza la importancia de adoptar una estrategia diversificada que explore todas las vías disponibles para reducir las emisiones. Esto incluye la producción de SAF, así como la mejora de la eficiencia operacional y el desarrollo de nuevas tecnologías.

- **Establecer un marco regulatorio con metas claras y consistentes:** La descarbonización de la aviación requiere políticas públicas alineadas con compromisos globales de reducción de emisiones. Se recomienda la creación de esquemas de carbono que permitan a las aerolíneas compensar sus emisiones y la implementación de incentivos fiscales en lugar de mandatos que encarezcan los costos. Asimismo, se propone facilitar la transparencia en el uso de créditos de carbono bajo el programa CORSIA.

- **Asegurar un crecimiento sostenible que potencie la competitividad regional:** La aviación es crucial para el desarrollo económico y conectividad en la región. Se resalta el potencial del SAF para generar empleo y estimular la economía.

- **Recomendaciones específicas para el desarrollo de SAF:**

- Fondos de inversión colaborativos
- Impulsar la inversión en infraestructura
- Desarrollar un entorno regulatorio favorable
- Apoyar la innovación en materias primas

Los cuatro anexos del documento complementan el análisis principal, proporcionando información detallada sobre diferentes aspectos clave para la descarbonización del sector aéreo en América Latina y el Caribe:

- **Anexo 1:** Se enfoca en el estado actual de los Combustibles Sostenibles de Aviación (SAF) y las perspectivas hacia 2050, destacando las proyecciones de demanda y oferta de SAF en la región, así como los diferentes métodos de producción y su evolución.

- **Anexo 2:** Explora los mecanismos de reducción de carbono, como los mercados de créditos de carbono para mitigar las emisiones remanentes que no pueden eliminarse completamente a través de los SAF o mejoras tecnológicas. También aborda los precios diarios para los créditos elegibles bajo el esquema CORSIA, cabe destacar que en la actualidad no hay ningún crédito elegible para CORSIA basado en la región de América Latina y el Caribe.

- **Anexo 3:** Proporciona un análisis del estado actual y futuro del combustible de aviación en la región, proyectando la demanda y producción de combustible de aviación tradicional hasta 2050.

- **Anexo 4:** Analiza la renovación de la flota y la densificación de cabina en la región, resaltando la incorporación de aviones más modernos y eficientes, así como el aumento en la capacidad de asientos por aeronave, optimizando así el uso del combustible y contribuyendo a la reducción de emisiones.

Logrando un Crecimiento Sostenible:

Promoviendo la Aviación Sostenible y Asegurando el Acceso Asequible al Transporte Aéreo en América Latina y el Caribe



Introducción

Contexto Histórico del Tráfico Aéreo en América Latina y el Caribe

Durante las últimas cinco décadas, la industria de la aviación en América Latina y el Caribe (ALC) ha experimentado un crecimiento que, medido en pasajeros transportados, se ha multiplicado por 18, pasando de 18 millones en 1970 a más de 324 millones en 2023. Este crecimiento ha superado al promedio global, que ha incrementado 14 veces en el mismo período (Gráfica 1).

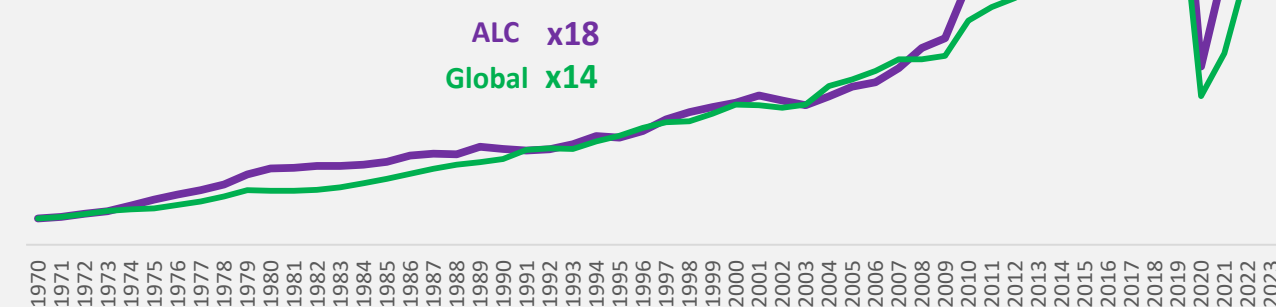
A pesar de desafíos como la crisis de deuda en América Latina en los años ochenta, la crisis del peso mexicano en 1994, los atentados del 11 de septiembre, el SARS y la pandemia de COVID, la región ha mostrado resiliencia. Tras una caída del 60% en el número de pasajeros durante la pandemia, la industria aérea en la región se recuperó con un crecimiento del 6.2% en 2023 respecto a 2019.

Este crecimiento subraya el papel de la aviación en la conectividad de la región, facilitando turismo, negocios y transporte de carga, fundamentales para el desarrollo económico. Sin embargo, la penetración del transporte aéreo, medida por la tasa de viajes per cápita, sigue siendo baja, con 0.64 viajes frente a más de 2 en regiones como EE. UU. y la UE, lo que evidencia un potencial de crecimiento considerable (ALTA).

La aviación contribuye al PIB y al empleo en América Latina y el Caribe, respaldando 7.7 millones de empleos y generando \$187 mil millones, lo que representa el 2.7% del empleo y el 3.5% del PIB regional. Estos empleos incluyen tanto los directos (722.000) generados por aerolíneas y aeropuertos como los indirectos (6.9 millones) derivados de la cadena de suministro y el turismo [1]. El transporte aéreo es esencial para acceder a servicios básicos como la atención médica en zonas urbanas, y en áreas sin alternativas de transporte, la conectividad aérea es clave para el desarrollo económico y la inclusión social.

A medida que la región sigue creciendo, es fundamental abordar los desafíos de sostenibilidad que este crecimiento conlleva.

Gráfica 1. Crecimiento relativo (1970=100) de Pasajeros 1970-2023



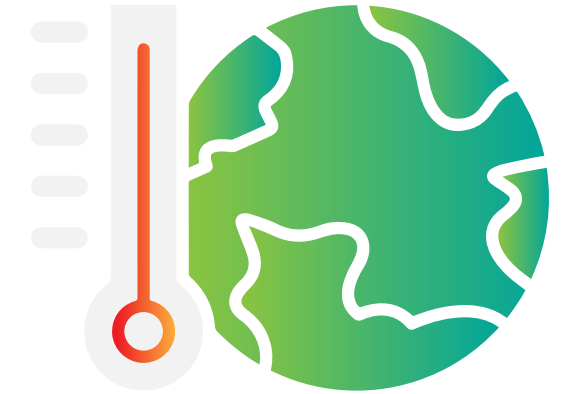
El número de pasajeros transportados por las aerolíneas de América Latina y el Caribe se ha multiplicado por 18, pasando de 18 millones de pasajeros en 1970 a más de 324 millones en 2023. El crecimiento ha estado por encima del promedio mundial.

Fuente: OACI, ALTA

Objetivo

El objetivo de este documento es proporcionar datos verificables que apoyen la estrategia integral de descarbonización de la industria de la aviación en América Latina y el Caribe. Esto abarca la producción a gran escala y la reducción de precios de los combustible sostenible de aviación (SAF), así como la implementación de eficiencias operativas, el desarrollo de nuevas tecnologías y el uso de compensaciones de carbono. El esfuerzo busca equilibrar los objetivos ambientales con la necesidad de garantizar el acceso al transporte aéreo en una región con baja penetración y pocas alternativas de transporte.

Cambio Climático y sus Consecuencias para la Industria Aérea



La industria de la aviación enfrenta un doble desafío: avanzar en la descarbonización mientras se adapta y construye resiliencia frente a los efectos del cambio climático. El cambio climático representa una amenaza significativa para los ecosistemas, economías y sociedades globales. Según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), el continuo aumento de las temperaturas globales tendrá como resultado eventos meteorológicos severos, aumento del nivel del mar y perturbaciones en los sistemas naturales y humanos.

Los eventos meteorológicos extremos, como tormentas, inundaciones, incendios forestales y temperaturas extremas, tienen repercusiones sobre la sociedad, la infraestructura y las operaciones aéreas. En 2022, las temperaturas estivales extremas en el Reino Unido causaron el derretimiento de pistas de aterrizaje, lo que obligó a suspender operaciones en ciertos momentos clave [2]. Asimismo, en abril de 2024, las altas temperaturas en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México obligaron a algunas aerolíneas a restringir el peso de los vuelos debido a la menor densidad del aire, lo que afecta la capacidad de despegue [3]. Además, las inundaciones extremas, como las que afectaron la torre de control del Aeropuerto de Porto Alegre, provocaron su cierre temporal [4]. Estas condiciones climáticas adversas no solo interrumpen las operaciones diarias, sino que también incrementan los costos operativos y aceleran el desgaste de las infraestructuras aeroportuarias.

Adicionalmente, el cambio climático ha exacerbado la frecuencia y severidad de la turbulencia en aire claro (CAT, por sus siglas en inglés). Estudios recientes han demostrado que la duración anual de la CAT ha aumentado significativamente en las últimas cuatro décadas, especialmente en el Atlántico Norte, donde su duración ha crecido un 17% entre 1979 y 2020, lo que afecta tanto la comodidad de los pasajeros

como el desgaste de las aeronaves [5]. Las tormentas no solo causan retrasos y desvíos, sino que también afectan la eficiencia del vuelo horizontal, impactando el consumo de combustible y las emisiones de CO₂. En la región Panamericana, los eventos meteorológicos relacionados con la turbulencia han mostrado un aumento en los últimos años, según el Grupo Regional de Seguridad de la Aviación para Panamérica (RASG-PA) en su informe anual [6]. Aunque no se consideran como Categorías de Alto Riesgo en la actualidad, los eventos meteorológicos severos, como la turbulencia, han sido la causa más común de incidentes en la región durante los últimos cinco años. En 2022, los accidentes vinculados a la turbulencia representaron el 43% de los incidentes reportados.

Las proyecciones indican que los impactos del cambio climático seguirán creciendo, afectando a diversos sectores, incluida la aviación. Según un estudio de EUROCONTROL [7] de 2021, el clima severo ya provoca hasta el 7.5% de los retrasos en la gestión del tráfico aéreo en Europa, y con una previsión de 16 millones de vuelos anuales para 2050, es probable que esta presión aumente. Además, el aumento del nivel del mar podría amenazar a más de dos tercios de los aeropuertos costeros de baja altitud, lo que podría generar cierres temporales con costos diarios estimados de 18 millones de euros para grandes aeropuertos y 3 millones para medianos.

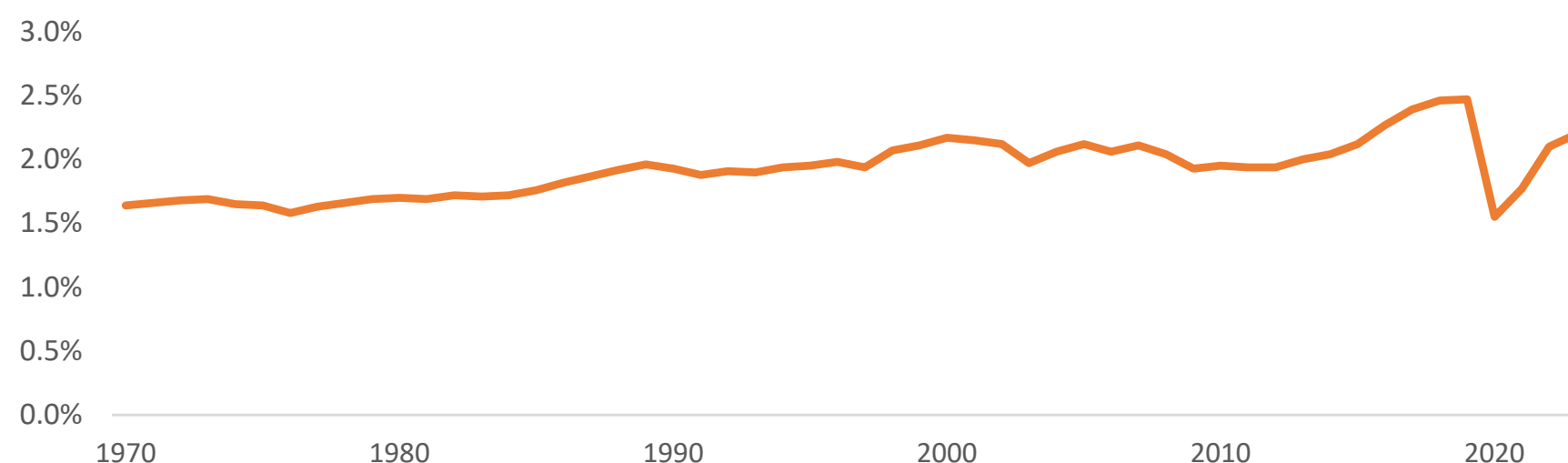
Por otro lado, los cambios en los patrones de los jet streams plantean nuevos retos, ya que las variaciones en la velocidad y dirección de estos vientos de gran altitud pueden aumentar el consumo de combustible y los tiempos de vuelo. En 2019, las aerolíneas volaron más de un millón de kilómetros adicionales para evitar grandes tormentas, lo que generó un consumo extra de 6,000 toneladas de combustible y la emisión de más de 19.000 toneladas de CO₂ [7].

Cambio Climático y sus Consecuencias para la Industria Aérea

Emisiones de la Industria Aérea y el Contexto Latinoamericano

A pesar de que el tráfico global aéreo se ha multiplicado en 14 veces desde 1970, década en la cual inició la desregulación del transporte aéreo, la contribución de la aviación al total de emisiones de CO₂ ha aumentado en menos de 1 punto porcentual (gráfica 2). Esto se debe a los grandes avances tecnológicos y las eficiencias alcanzadas. Durante este período, se han implementado numerosas innovaciones en el diseño de aviones y motores más eficientes, lo que ha permitido un uso más efectivo del combustible.

Gráfica 2.
Emisiones de Aviación como % del Total



Fuente: Global Carbon Budget, EIA, Estimaciones ALTA

En total, las emisiones de CO₂ de la industria de la aviación fueron de aproximadamente 867 millones de toneladas en 2023 [8], con un 43% producto de vuelos domésticos y un 57% de vuelos internacionales. A pesar de que el tráfico medido en RPK (Pasajeros-Kilómetro) ha aumentado casi un 40%, las emisiones totales han aumentado un 18% entre 2013 y 2023, demostrando que la industria ha realizado esfuerzos en eficiencias operativas.

Cambio Climático y sus Consecuencias para la Industria Aérea

Emisiones de la Industria Aérea y el Contexto Latinoamericano

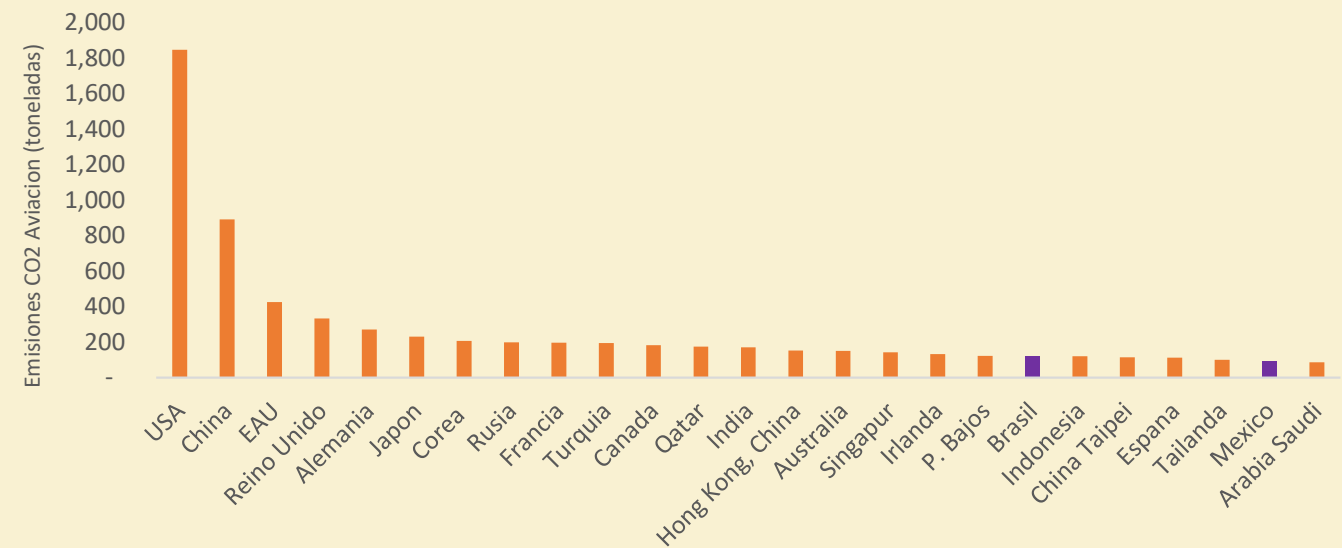


De los 25 países con mayores emisiones de CO2 derivadas de la aviación, únicamente hay dos países de la región de América Latina y el Caribe; Brasil y México, cuyas emisiones totales representan el 2.6% de las emisiones acumuladas de aviación entre 2013 y 2023 [8], (gráfica 3).

En total, las aerolíneas basadas en la región fueron responsables del 4.8% de las emisiones de CO2 acumuladas en ese mismo período [8]. En contraste, las regiones de Asia-Pacífico, Norteamérica y Europa fueron responsables del 83.4% de las emisiones totales acumuladas en el mismo periodo. Lo anterior, refleja la disparidad en la contribución de las diferentes regiones a las emisiones globales de aviación, destacando la necesidad de enfoques regionales específicos para la mitigación del impacto ambiental de la aviación. La diferencia en las emisiones también subraya la importancia de políticas y tecnologías adaptadas a las particularidades de cada región, con el objetivo de reconocer las realidades, capacidades y potenciales y al mismo tiempo buscar lograr una reducción equitativa de las emisiones en el sector aéreo a nivel mundial.

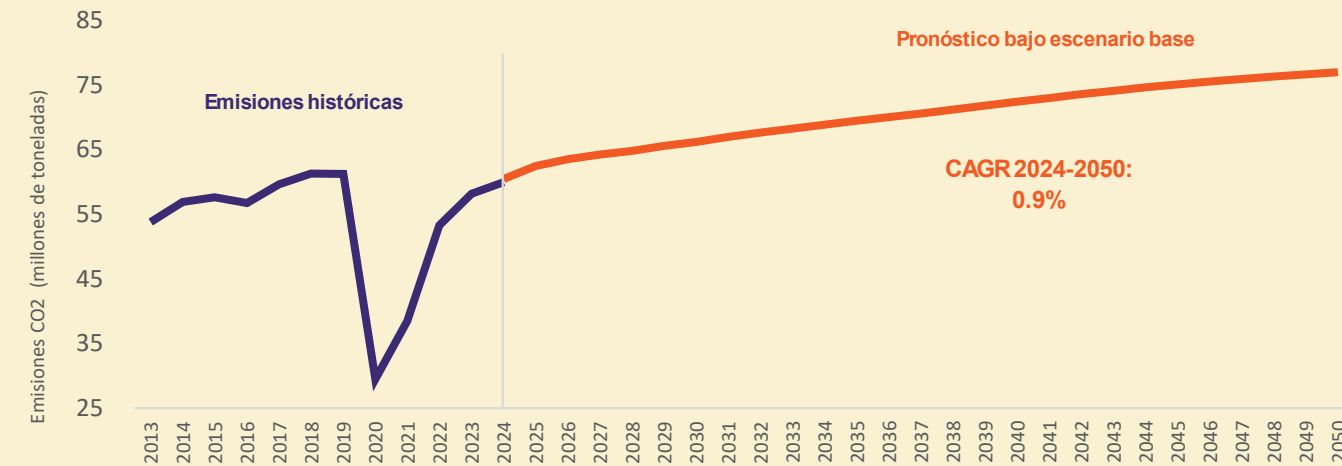
Según estimaciones internas proporcionadas por S&P Global para este estudio, se prevé que entre 2024 y 2050, las emisiones del sector aéreo en América Latina y el Caribe experimenten un crecimiento promedio anual del 0.9%, con un aumento del 32% en comparación con los niveles de 2023 (gráfica 4). Estas proyecciones están basadas en un escenario que considera el repunte de la demanda de energía tras la pandemia de COVID-19, en un contexto geopolítico y macroeconómico complejo.

Gráfica 3.
Top 25 por países de Emisiones de Aviación Acumuladas 2013-2023



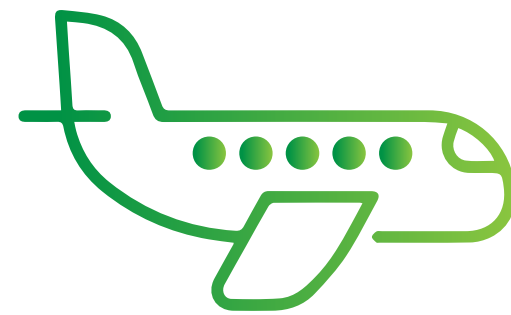
Fuente: OECD

Gráfica 4.
Pronóstico de Emisiones de la Industria Aérea en Latinoamérica (2013-2050)



Fuente: S&P Global Commodity Insights. © 2024 S&P Global

Iniciativas de Descarbonización Recientes en el Sector Aéreo de América Latina y el Caribe

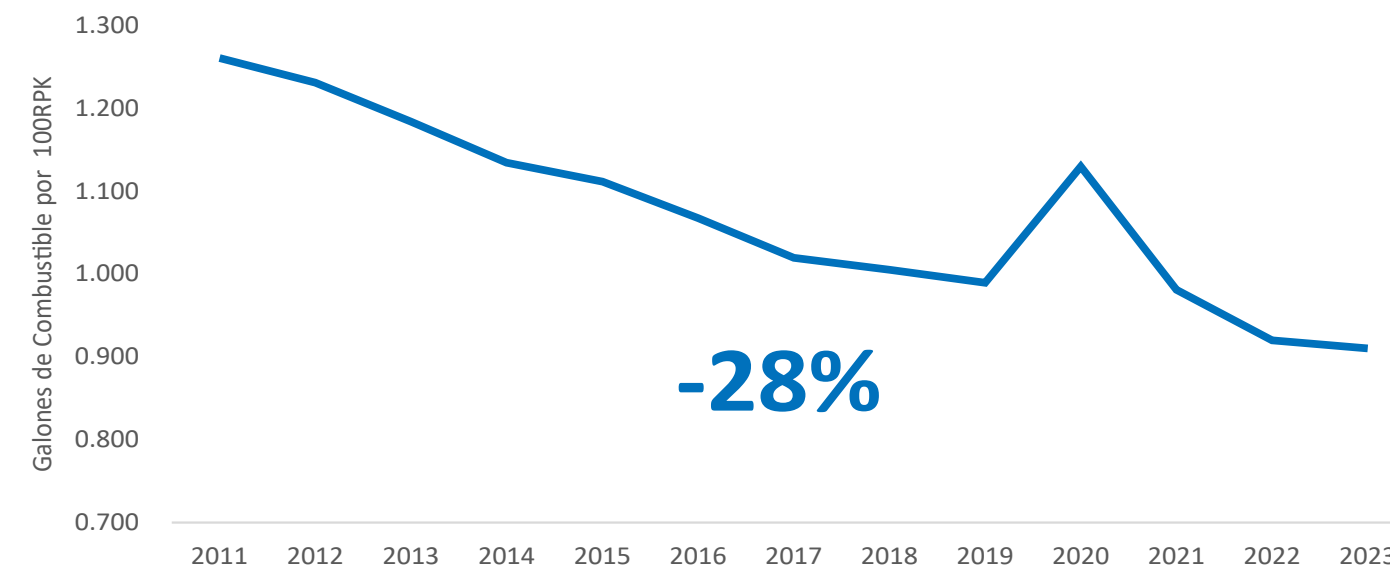


A través de mejoras operativas, renovación de la flota, innovación tecnológica y un fuerte compromiso con la eficiencia, la industria de la aviación en América Latina ha logrado reducir su intensidad de emisiones durante la última década. Como se observa en el gráfico 5, desde 2011 hasta 2023, el consumo de combustible por cada 100 RPK ha disminuido un 28%, con una tasa media anual de eficiencia superior al 2%.

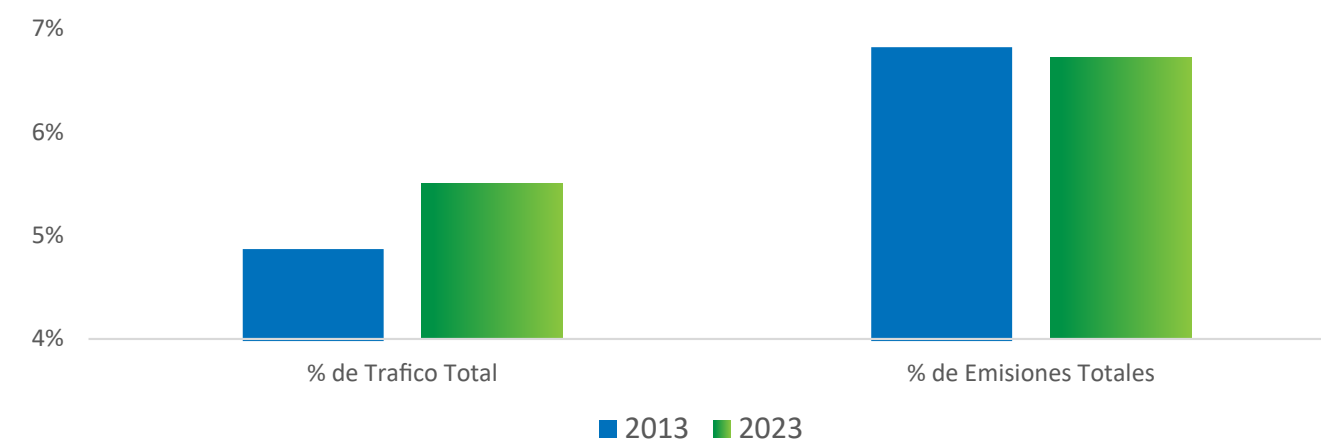
La última generación de aviones consume entre un 15% y un 20% menos de combustible que la flota anterior, lo que contribuye a una reducción significativa de las emisiones de CO₂. Las aerolíneas miembros de la Asociación Latinoamericana y del Caribe de Transporte Aéreo (ALTA) han conseguido reducir la edad promedio de sus flotas en un 18%. En comparación con aerolíneas de mercados desarrollados como Estados Unidos y Europa, las flotas de ALTA son un 37% y un 22% más jóvenes, respectivamente. Para un análisis más detallado sobre la renovación de flota y las iniciativas de densificación de cabinas para reducir la huella de carbono, consulte el Anexo 4 al final del documento.

Las mejoras en eficiencias por parte de las aerolíneas de América Latina y el Caribe les han permitido aumentar su proporción del mercado total y, al mismo tiempo, reducir su participación en el porcentaje de emisiones totales (gráfica 6).

Gráfica 5. Consumo de Combustible por cada 100RPK



Gráfica 6. Participación de las aerolíneas de ALC en tráfico y emisiones totales (2023 vs. 2013)



Estrategias de Descarbonización en la Aviación



Estrategias de Descarbonización en la Aviación

La industria de la aviación enfrenta el desafío significativo de lograr emisiones netas cero para 2050. El Documento Waypoint 2050, desarrollado por el Air Transport Action Group (ATAG) [8], establece una visión detallada y escenarios posibles para alcanzar este objetivo. A continuación, se presentan las estrategias clave y los escenarios de descarbonización descritos en el informe:

Estrategias clave de Descarbonización

Mejoras Operacionales e Infraestructurales



- Optimización de rutas y gestión del tráfico aéreo: La optimización de rutas y mejoras en la gestión del tráfico aéreo pueden reducir las emisiones significativamente. Estas mejoras pueden implementarse más rápidamente que las innovaciones tecnológicas a nivel de aeronaves.

- Eficiencia en aeropuertos: Tecnologías emergentes en aeropuertos y sistemas de navegación contribuirán a la eficiencia y la reducción de emisiones. Medidas como la reducción del tiempo de rodaje y el uso de unidades de potencia auxiliares también son importantes.

Es importante destacar que muchas de estas medidas no dependen de la industria si no de los gobiernos y otros actores.

Medidas de Reducción de Carbono Fuera del Sector



- Compensaciones de carbono: En el corto plazo, las compensaciones de carbono se presentan como una medida complementaria disponible mientras se desarrollan tecnologías y SAF. A largo plazo, la captura y almacenamiento de carbono serán esenciales para lograr emisiones netas cero, ya que en todos los escenarios hay emisiones adicionales que no pueden ser reducidas y, por lo tanto, deben ser gestionadas a través de medidas basadas en el mercado. Uno de los primeros marcos regulatorios globales para abordar las emisiones de la aviación internacional es CORSIA, desarrollado por la OACI con el objetivo limitar el crecimiento de las emisiones netas de CO2 a partir de 2020 mediante la compra de créditos de carbono para compensar las emisiones que exceden los niveles de referencia. Es un esfuerzo clave para estabilizar las emisiones de la aviación mientras se desarrollan tecnologías de descarbonización a largo plazo.

En la región, CORSIA enfrenta varios desafíos, especialmente la falta de suficientes créditos de carbono elegibles para su implementación. Las aerolíneas de la región se ven limitadas en cuanto a las opciones disponibles para compensar sus emisiones, lo que pone en riesgo su cumplimiento con los requisitos del esquema. Esta situación subraya la necesidad de desarrollar proyectos locales de generación de créditos de carbono en ALC que sean reconocidos por CORSIA.

Innovación Tecnológica



- Desarrollo de nuevas aeronaves: La modernización de la flota con aviones más eficientes en combustible, motores avanzados y materiales más ligeros puede reducir el consumo de combustible en un 15-20% por generación.

- Propulsión alternativa: Se espera que la propulsión eléctrica, híbrida y por hidrógeno desempeñe un papel crucial, especialmente en vuelos de corto y mediano alcance. El desarrollo y adopción de estas tecnologías requerirán inversiones significativas y coordinación en toda la industria.

Combustibles Sostenibles de Aviación (SAF)



- Despliegue masivo de SAF: Los SAF pueden reducir las emisiones de CO2 hasta en un 80% en comparación con el combustible convencional. Se estima que se necesitarán entre 330 y 445 millones de toneladas de SAF anualmente para 2050, lo que requerirá una inversión de hasta 1.45 billones de dólares.

- Diversificación de fuentes: Los SAF pueden provenir de diversas fuentes, incluidos cultivos no alimentarios, residuos y combustibles producidos a partir de CO2 reciclado y electricidad de bajo carbono.

(Waypoint 2050).

Medidas Regulatorias



- Incentivos financieros y fiscales: En lugar de imponer cuotas, es necesario diseñar incentivos que fomenten la inversión en tecnologías sostenibles. Esto incluye subsidios, créditos fiscales y financiamiento preferencial para proyectos de innovación en combustibles alternativos. Estos incentivos pueden acelerar la transición hacia una aviación más sostenible y ayudar a las aerolíneas a cumplir con los objetivos sin poner en riesgo su competitividad.

Estrategias de Descarbonización en la Aviación

Escenarios de Descarbonización

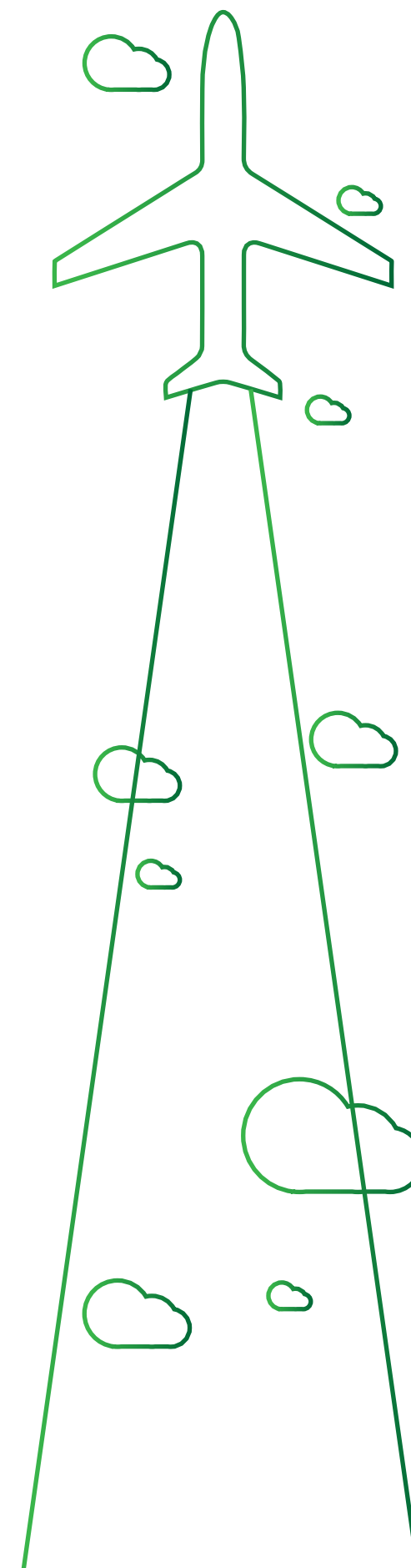
El informe sobre la viabilidad de un Objetivo Aspiracional a Largo Plazo (Long-Term Aspirational Goal, LTAG) [10] de la OACI presenta tres escenarios integrados que exploran cómo la aviación puede reducir sus emisiones de CO2 a largo plazo. A continuación, se detallan los escenarios, con cifras clave para las emisiones, el uso de combustibles sostenibles y las inversiones necesarias:

ESCENARIO IS1:

- **Crecimiento del Tráfico:** Se utiliza un pronóstico de tráfico de base media, desarrollado a partir de las tendencias actuales. Para el año 2050, se estima que las emisiones anuales sean de 950 MtCO2 y de 1,420 MtCO2 para 2070.
- **Desarrollos Tecnológicos:** Este escenario incluye aeronaves de configuración convencional (tube and wing), con mejoras incrementales en eficiencia operativa, como la reducción de consumo de combustible por medio de tecnologías conocidas.
- **Mejoras Operacionales e Infraestructurales:** Se esperan mejoras limitadas en la eficiencia operativa, con una implementación lenta de tecnologías de optimización como los Bloques de Actualización del Sistema de Aviación (ASBU).
- **Combustibles:**
 - SAF de biomasa: Se espera que cubra el 19% del uso total de energía para 2050, con una inversión aproximada de 480 mil millones de dólares.
 - Combustibles basados en residuos gaseosos: Cubrirán el 8% del uso total de energía para 2050, con una inversión de 710 mil millones de dólares.
 - LTAG-LCAF (combustibles líquidos de bajo carbono): Contribuirán con un 7% del uso total de energía en 2050, con una inversión de 50 mil millones de dólares.
 -
- **Compensaciones de Carbono:** Las emisiones acumuladas entre 2021 y 2050 alcanzarán 22 GtCO2. Debido a la baja adopción de tecnologías avanzadas y SAF, se requerirá un uso significativo de compensaciones de carbono.
-
- **Inversiones y Costos:** Se espera una inversión relativamente baja en tecnologías avanzadas, pero las compensaciones de carbono tendrán un costo considerable, sumando un total de 2.3 billones de dólares durante el período.

ESCENARIO IS2:

- **Crecimiento del Tráfico:** Se basa en un crecimiento medio del tráfico, con emisiones anuales proyectadas de 495 MtCO2 para 2050 y de 600 MtCO2 para 2070.
- **Desarrollos Tecnológicos:** En este escenario, se introducen aeronaves de concepto avanzado (Advanced Concept Aircraft), con cambios significativos en la arquitectura de los aviones que mejoran su eficiencia energética.
- **Mejoras Operacionales e Infraestructurales:** El despliegue de tecnologías operacionales será moderado, con un mayor nivel de optimización operativa en comparación con el escenario IS1.
- **Combustibles:**
 - SAF de biomasa: Cubrirá el 53% del uso total de energía en 2050, con una inversión de aproximadamente 1,200 mil millones de dólares.
 - Combustibles basados en residuos gaseosos: Representarán el 19% del uso de energía en 2050, con una inversión de 1,000 mil millones de dólares.
 - LTAG-LCAF: Proveerá un 28% del uso de energía, con una inversión de 105 mil millones de dólares.
- **Compensaciones de Carbono:** Las emisiones acumuladas serán de 17 GtCO2, considerablemente menores que en el escenario IS1. Las compensaciones de carbono se reducirán a un costo estimado de 230 mil millones de dólares.
- **Inversiones y Costos:** Este escenario requiere mayores inversiones en tecnologías avanzadas y SAF, pero los costos relacionados con las compensaciones de carbono serán mucho menores.

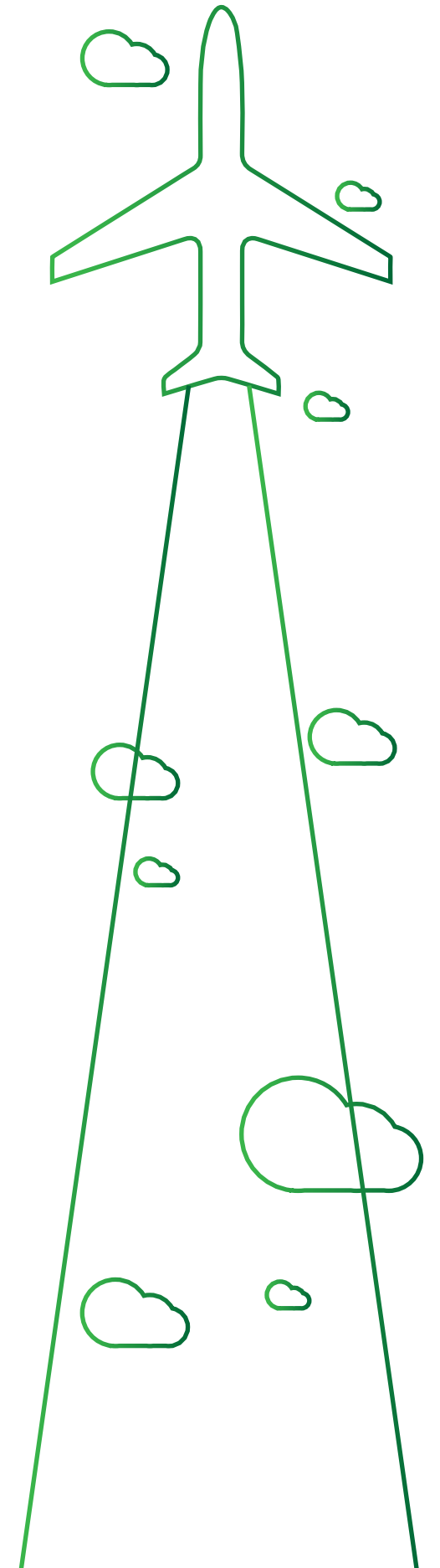


Estrategias de Descarbonización en la Aviación

Escenarios de Descarbonización

ESCENARIO IS3:

- **Crecimiento del Tráfico:** A pesar del crecimiento proyectado del tráfico, las emisiones se reducirán drásticamente, con emisiones anuales de solo 200 MtCO₂ para 2050 y de 210 MtCO₂ para 2070.
- **Desarrollos Tecnológicos:** El despliegue de aeronaves propulsadas por hidrógeno será clave, junto con otras innovaciones radicales que cambiarán la configuración de las infraestructuras aeroportuarias y energéticas.
- **Mejoras Operacionales e Infraestructurales:** Se espera una implementación agresiva de tecnologías avanzadas tanto en las operaciones terrestres como aéreas, optimizando la eficiencia de las operaciones de vuelo.
- **Combustibles:**
 - SAF de biomasa: Cubrirá el 42% del uso total de energía en 2050, con una inversión de 950 mil millones de dólares.
 - Combustibles basados en residuos gaseosos: Representarán el 46% del uso de energía, con una inversión de 1,700 mil millones de dólares.
 - SAF de CO₂ atmosférico: Proveerá el 10% del uso de energía para 2050, con una inversión de 460 mil millones de dólares.
 - Hidrógeno: Proveerá un 2% del uso de energía en 2050, con una inversión de 55 mil millones de dólares, además de inversiones adicionales en infraestructura aeroportuaria de hidrógeno por un valor estimado de 125 mil millones de dólares.
- **Compensaciones de Carbono:** Las emisiones acumuladas entre 2021 y 2050 serán de 12 GtCO₂, con la menor dependencia de compensaciones de carbono debido a la adopción masiva de tecnologías limpias y combustibles alternativos.
- **Inversiones y Costos:** Este escenario requiere la mayor inversión (hasta 4 billones de dólares hasta 2050), pero las compensaciones de carbono necesarias serán mínimas, lo que reducirá significativamente los costos operativos.



Costos para Alcanzar la Descarbonización

La transición hacia una aviación neta cero implicará costos significativos a nivel global.

Costos Globales de Descarbonización

Según el informe Waypoint 2050 de ATAG [9] y el análisis de ICAO LTAG [10], los costos globales de la transición a una aviación neta cero se desglosan en varias categorías principales:

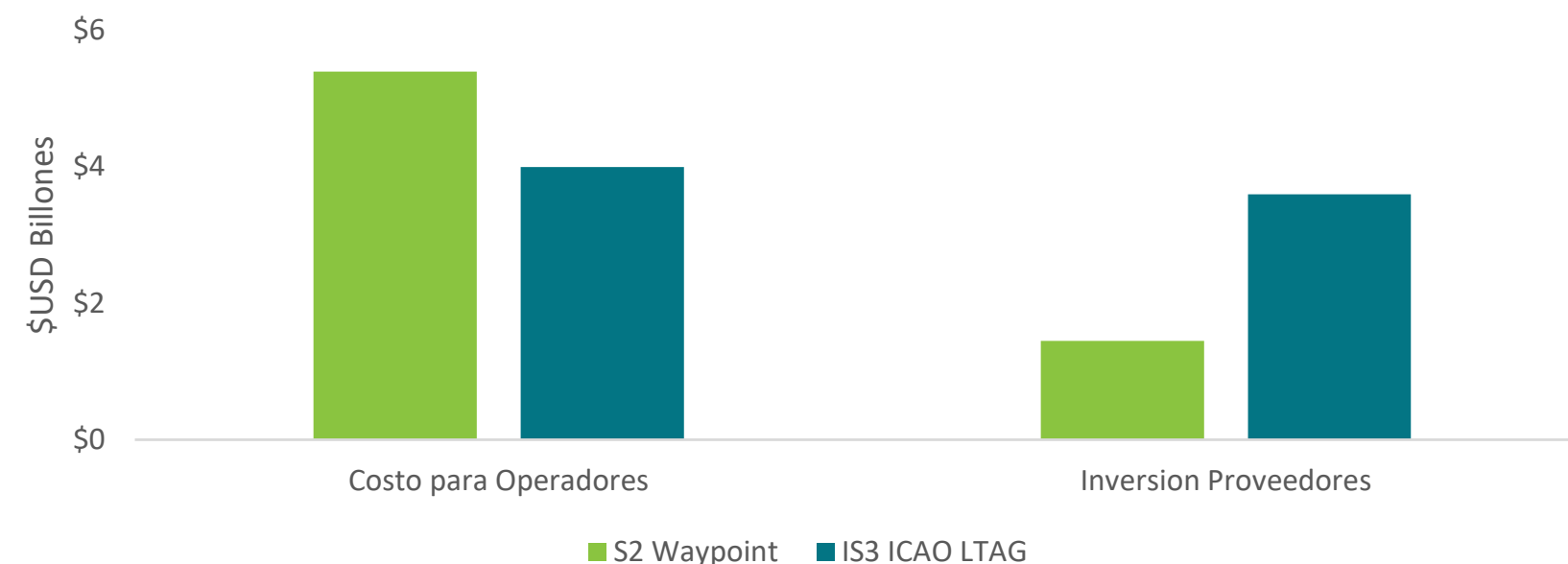
Costos para los Operadores de Aeronaves:

- Inversión Global en el Escenario S2 de Waypoint 2050: Hasta \$5.3 billones de 2020 a 2050.
- Inversión Global en el Escenario IS3 de ICAO LTAG: Hasta \$4 billones de 2020 a 2050.
- Promedio Anual Global: \$170 mil millones (Waypoint 2050) y \$130 mil millones (ICAO LTAG).

Inversión por Proveedores (OEMs y Proveedores de Combustible):

- Inversión Global en el Escenario S2 de Waypoint 2050: Hasta \$1.45 billones de 2020 a 2050.
- Inversión Global en el Escenario IS3 de ICAO LTAG: Hasta \$3.6 billones de 2020 a 2050.
- Promedio Anual Global: \$50 mil millones (Waypoint 2050) y \$120 mil millones (ICAO LTAG). (Gráfica 7).

Gráfica 7.
Costos e Inversiones Globales de Descarbonización



Otros Costos o Inversiones:

Waypoint 2050: Incluye costos no recurrentes de los OEM (nuevas inversiones en programas de aeronaves), inversiones en investigación y desarrollo gubernamental, inversiones relacionadas con aeropuertos (operaciones e infraestructura de hidrógeno), y costos de implementación de medidas operacionales por los proveedores de servicios de navegación aérea (ANSP).

ICAO LTAG: Similar a Waypoint 2050, pero con una mayor inclusión de medidas fuera del sector para cerrar la brecha hacia el objetivo de emisiones netas cero.

Costos para Alcanzar la Descarbonización

Costos Proporcionales para América Latina y el Caribe

Asumiendo que América Latina y el Caribe (ALC) representan aproximadamente el 6% del tráfico aéreo mundial, y que esta participación se mantendrá hasta 2050, es posible estimar los costos proporcionales para la región basados en los escenarios de Waypoint 2050 y el análisis del ICAO CAEP LTAG. Sin embargo, este enfoque es conservador, ya que la falta de infraestructura en la región eleva considerablemente los costos de implementación del SAF.

Un ejemplo claro es el caso de Colombia, donde Ecopetrol producirá SAF en la refinería de Reficar. Transportar el SAF hasta Bogotá no solo añade costos significativos por el transporte, sino también emisiones adicionales. Además, en general, la inversión en maquinaria y tecnología en Latinoamérica suele ser más alta debido a la necesidad de importar tecnología avanzada. A esto se suman las tasas impositivas elevadas en varios países de la región, que penalizan el desarrollo de proyectos de SAF y agravan los costos operativos.

Por estas razones, aunque el análisis se basa en que los costos serán proporcionales al 6% del tráfico global, es importante destacar que este es un escenario conservador.

La realidad es que América Latina probablemente enfrentará costos más altos debido a la infraestructura limitada, los costos de transporte y las barreras fiscales que afectan la competitividad de la región. Sin embargo, para efectos de simplicidad, el análisis de costos se mantiene en este 6%:

Costos para los Operadores de Aeronaves:

- Costo Proporcional a costo global de Waypoint 2050 (S2): US\$318.000 millones de 2020 a 2050.
- Costo Proporcional a costo global de ICAO LTAG (IS3): US\$240.000 millones de 2020 a 2050.
- Promedio Anual Proporcional: US\$10.200 millones (Waypoint 2050) y US\$7.800 millones (ICAO LTAG).

Estos costos incluyen la inversión en producción de SAF,

desarrollo de nuevas tecnologías de aeronaves, mejoras operacionales e infraestructurales, y medidas de compensación de carbono. Cabe destacar que los costos anuales promedio serán menores en los primeros años y aumentarán en los años posteriores a medida que el tráfico y el uso de combustible incrementen. La colaboración entre los gobiernos, las aerolíneas, los proveedores de energía y otros actores clave será crucial para financiar y llevar a cabo esta transición hacia una aviación sostenible y emisiones netas cero en la región.

El análisis y los cálculos de costos se centran en el escenario 2 de Waypoint 2050 de ATAG, que prioriza la adopción masiva de combustibles de aviación sostenibles (SAF) e incluye los costos asociados a la descarbonización de la aviación doméstica. Esto es especialmente relevante, dado que aproximadamente el 55% del tráfico en América Latina y el Caribe es doméstico. La elección de centrarse en SAF se debe a las dificultades para aislar y cuantificar los costos incrementales de las mejoras tecnológicas en las aeronaves. Los precios de transacción de las aeronaves no son públicamente disponibles, lo que complica la estimación del impacto de estas mejoras en el costo total de las aeronaves. Además, es difícil determinar la relación entre los costos de adquisición de nuevas aeronaves y los ahorros de combustible que estas podrían ofrecer. Aunque algunas nuevas tecnologías, como las aeronaves impulsadas por hidrógeno, podrían implicar costos adicionales, estos podrían ser compensados por una reducción en los costos operativos.

Los escenarios de Waypoint 2050 y los análisis de LTAG muestran que SAF será la principal fuente de reducción de emisiones antes de 2050. Por esta razón, el análisis se centra en los costos y beneficios de aumentar el uso de SAF para alcanzar los objetivos de emisiones netas cero. Este enfoque permite una evaluación más clara y cuantificable del impacto financiero y operativo de la transición hacia una aviación más sostenible. (Para conocer más información sobre el estado actual de

los Combustibles Sostenible de Aviación (SAF) en la región refiérase al anexo 1).

Supuestos de Precios de SAF

Basado en las proyecciones y escenarios de ICAO/CAEP, el análisis de Waypoint 2050 se enfoca en las siguientes suposiciones de precios unitarios de SAF:

- Combustibles derivados de residuos y biomasa:
- En 2020: aproximadamente \$1.220 por tonelada.
- En 2050: aproximadamente \$1.460 por tonelada.
- Combustibles basados en gases residuales:
- En 2020: aproximadamente \$3.650 por tonelada.
- En 2050: aproximadamente \$1.700 por tonelada.
- Combustibles power-to-liquid derivados de CO2 atmosférico:
- En 2020: aproximadamente \$4.250 por tonelada.
- En 2050: aproximadamente \$1.280 por tonelada.

Es importante destacar que se asume el máximo apoyo estatal y gubernamental posible para llegar a estos precios proyectados. Estas proyecciones de precios, basadas en el informe LTAG, se utilizan para estimar los costos de la transición hacia SAF y su impacto en los costos operativos de las aerolíneas. Para tener un contexto de cómo se comparan estos precios proyectados de SAF con los precios de combustible actuales, durante el último año el precio promedio por tonelada del combustible jet en América Latina y el Caribe fue de US\$890 por tonelada. Esto significa que, dependiendo del tipo de SAF utilizado en el futuro, los precios de SAF podrían ser entre un 40% y un 350% más costosos que el promedio del combustible jet convencional durante el último año.

Esta comparación resalta el desafío económico que implica la transición hacia SAF, subrayando la necesidad de políticas de apoyo y subsidios para facilitar esta transición y minimizar el impacto en la conectividad.



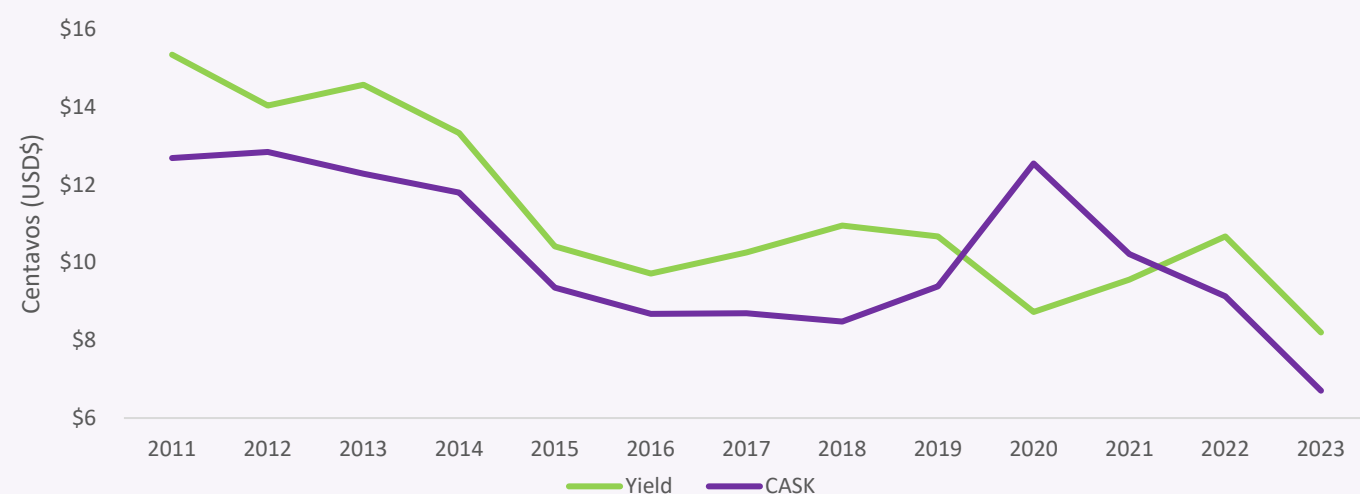
Impacto en los Precios de los Boletos Aéreos



Impacto en los Precios de los Boletos Aéreos

La adopción de combustibles sostenibles de aviación (SAF) es clave para reducir las emisiones de CO₂, pero también podrían impactar los precios de los boletos aéreos y la conectividad. El precio de un boleto es complejo, influenciado por múltiples factores como la competencia, los costos operativos, la demanda y las políticas gubernamentales. Aunque las tarifas han disminuido desde la desregulación en los años 70, esta reducción no ha sido uniforme en todas las rutas. Históricamente, nuevas tecnologías y mayor eficiencia han permitido reducir costos operativos y, en consecuencia, el precio de los boletos. En un entorno competitivo con márgenes estrechos, las aerolíneas de América Latina y el Caribe han logrado reducir su CASK en un 46.6% desde 2011, mientras que el Yield ha caído un 47.72% en términos reales (gráfica 8). Esta relación casi lineal entre CASK y Yield puede servir para prever cómo podrían evolucionar las tarifas con futuros aumentos en los costos operativos.

Gráfica 8.
Evolución del CASK (costo por asiento-km disponible) y del Yield (ingresos por pasajero-km) de las aerolíneas de ALC, valores ajustados a la inflación.



Fuente: Análisis ALTA basado en los estados financieros de las compañías aéreas

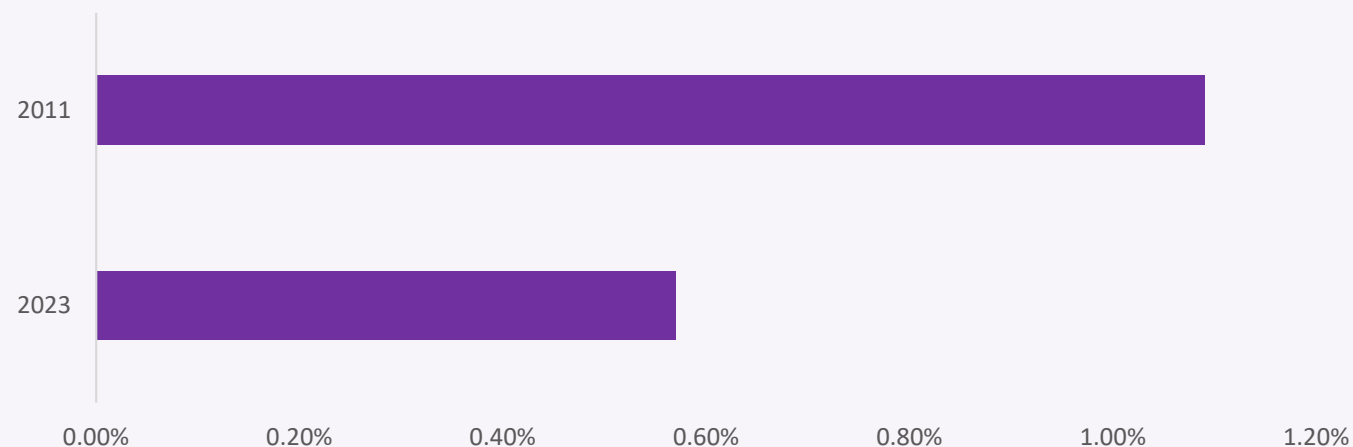
Esta tendencia no se limita a América Latina y el Caribe, sino que se observa a nivel global. Según datos de IATA, en las últimas cinco décadas, la industria aérea mundial ha experimentado una notable disminución en los costos unitarios reales, reduciéndose más de cuatro veces, junto con una reducción casi seis veces en los Yields reales. Este descenso ha sido impulsado por avances tecnológicos, como la introducción de motores a reacción y sistemas digitales, así como por cambios regulatorios significativos. A pesar de diversos choques macroeconómicos, la mejora continua en la eficiencia operativa y la intensa competencia han mantenido esta reducción de costos, y se espera que continúe en el futuro.

Gracias a la reducción de costos y las mejoras en la eficiencia operativa, volar en América Latina es más asequible hoy que en 2011 (gráfica 9). Para medir esta accesibilidad, se utilizó la proporción de la tarifa promedio de cada año respecto al Producto Interno Bruto (PIB) per cápita ajustado por Paridad de Poder Adquisitivo (PPP). Esta relación muestra la parte del ingreso de los pasajeros destinada a volar, y su reducción sugiere que volar se ha vuelto más asequible en términos relativos, ya sea por el aumento de ingresos, la disminución de tarifas en términos reales, o ambos. En el caso de América Latina, el ingreso per cápita ha aumentado un 7.2% desde 2011, mientras que la tarifa promedio en términos reales ha disminuido más de un 40%.

Es importante señalar que, aunque a nivel regional la accesibilidad ha mejorado, el impacto de esta reducción de tarifas varía entre países debido a diferencias en niveles de ingresos, distribución de la riqueza y costos asociados al transporte aéreo. Esta variabilidad influye en la capacidad de los pasajeros para acceder al transporte aéreo en distintos mercados. El gráfico a continuación muestra la tarifa promedio por vuelo para la región de América Latina y el Caribe, calculada utilizando el Yield de cada año y la distancia promedio por etapa de 1,500 kilómetros. En 2011, el Yield ajustado a precios de 2021 era de 13.26 centavos, mientras que en 2023 se redujo a 7.29 centavos. Esta reducción demuestra que, a pesar de los costos operativos, el costo de volar ha disminuido en términos reales, mejorando la accesibilidad y fomentando la conectividad.

Volar en América Latina hoy en día es significativamente más asequible que en 2011 (gráfica 9).

Gráfica 9.
Tarifa media como % de PIB per Cápita (PPP, precios \$ de 2021)



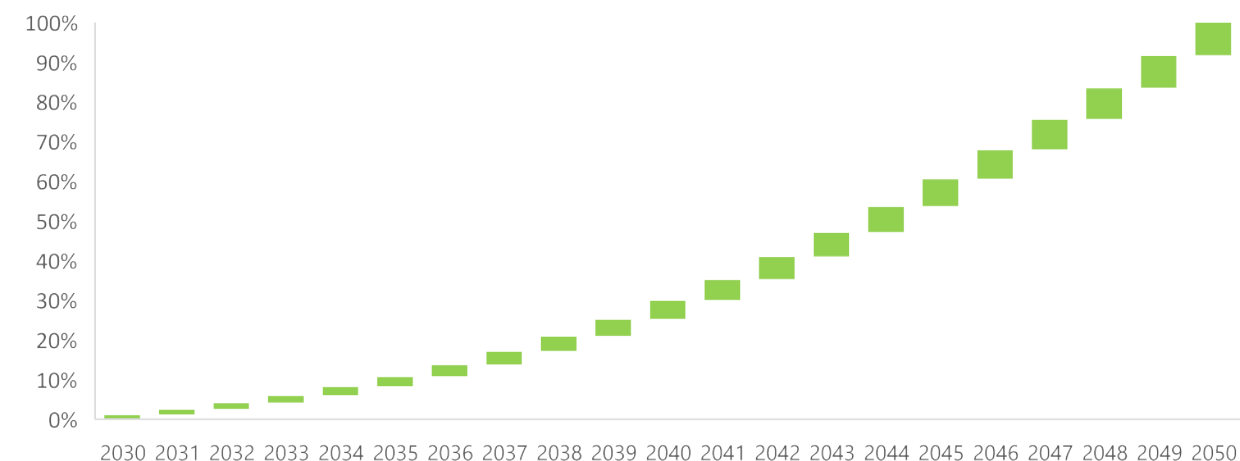
Impacto en los Precios de los Boletos Aéreos

Estimación de Incremento en las Tarifas Aéreas

La transición de combustibles fósiles a SAF conlleva un aumento en los costos operativos. Utilizando las cifras del estudio Waypoint 2050 del Air Transport Action Group (ATAG), descrito en las secciones anteriores, se estima un sobrecosto total para América Latina y el Caribe de 318 mil millones de USD en el período 2030-2050 bajo el escenario S2 (aplicando los costos proporcionales de acuerdo con el porcentaje de tráfico). Para distribuir este sobrecosto de manera realista a lo largo del tiempo, se empleó una curva logística, un modelo matemático comúnmente utilizado para representar la adopción gradual de nuevas tecnologías [11][12]. Este modelo permite capturar cómo el incremento en los costos se acelerará a medida que avance la adopción del SAF, alcanzando su punto máximo hacia 2050. La curva logística asegura que los costos anuales se distribuyan de manera progresiva, comenzando de forma modesta en 2030 y aumentando gradualmente, reflejando una adopción escalonada y realista de esta nueva tecnología.

A continuación, se presenta en la gráfica 10, la distribución porcentual del sobrecosto total de \$US318.000 millones durante el período 2030-2050, calculada mediante la curva logística:

Gráfica 10.
Distribución Porcentual Anual de Sobrecosto total por adopción de SAF



Para efectos de este documento, se busca cuantificar cuánto podrían incrementarse las tarifas aéreas como resultado de la descarbonización, comparado con el escenario actual. Algunos de los supuestos son la tasa de crecimiento del tráfico aéreo y una reducción promedio del 2% anual tanto en el CASK no relacionado con combustible como en el CASK relacionado con combustible. Dado que cuantificar con precisión el impacto futuro es inherentemente complejo, se ha adoptado un modelo basado en referencias de trabajos y estudios previos realizados en el campo de la economía del transporte aéreo.

El estudio de Wang et al. [13] explora cómo los costos operativos, específicamente el Costo por Asiento-Kilómetro Disponible (CASK), influyen en las tarifas aéreas. Los autores destacan que un aumento en el CASK total tiende a elevar las tarifas aéreas, particularmente en mercados donde las aerolíneas pueden trasladar estos costos a los pasajeros. El CASK de combustible tiene una influencia significativa en el Yield, ya que el combustible representa una parte importante de los costos operativos, mientras que el CASK no relacionado con el combustible tiene un impacto más

limitado.

Wang et al. concluyen que las tarifas aéreas son particularmente sensibles a los cambios en el costo del combustible, con variaciones regionales que reflejan las diferencias en la estructura de mercado y la elasticidad de la demanda en distintas regiones. Estos hallazgos subrayan la importancia de considerar el contexto regional al analizar cómo los costos operativos podrían influir en las tarifas.

Utilizando una metodología similar, se implementó un modelo de regresión lineal múltiple para analizar la relación entre el Yield y los diferentes componentes del CASK en el contexto de América Latina y el Caribe. Este modelo permite explorar cómo los costos operativos adicionales debidos a la descarbonización podrían traducirse en aumentos en las tarifas aéreas. El modelo desarrollado en este documento se basa en datos históricos de CASK y Yield correspondientes al período 2004-2023. Estos datos han sido recopilados por la Asociación Latinoamericana y del Caribe de Transporte Aéreo (ALTA) a partir de los reportes financieros publicados por las aerolíneas miembros, complementados con análisis propios realizados por ALTA.

Impacto en los Precios de los Boletos Aéreos

Estimación de Incremento en las Tarifas Aéreas

Metodología del Modelo:

Para analizar la relación entre los costos operativos y el Yield, se implementó un modelo de regresión lineal múltiple. Este tipo de modelo permite cuantificar el impacto de múltiples variables independientes en una variable dependiente, en este caso, el Yield (ingreso por pasajero-kilómetro). La fórmula del modelo es la siguiente:

$$\text{Yield} = \alpha + \beta_1 \times \text{CASK} + \beta_2 \times \text{CASK (ex-combustible)} + \beta_3 \times \text{CASK (combustible)} + \epsilon$$

Donde:

- α es la constante del modelo, que representa el valor del Yield cuando todas las variables independientes son cero.
- β_1, β_2 y β_3 son los coeficientes de regresión que indican el cambio esperado en el Yield por cada unidad de cambio en CASK, CASK (ex - combustible), y CASK (combustible), respectivamente
- ϵ es el término de error, que captura la variabilidad del Yield no explicada por las variables incluidas en el modelo.

Resultados del Modelo:

El modelo de regresión lineal múltiple arrojó los siguientes resultados:

- **CASK total:** Coeficiente de 1.0583 ($p < 0.001$), lo que indica que un aumento en el CASK se asocia con un incremento significativo en el Yield. Por cada unidad adicional de CASK, el Yield aumenta en aproximadamente 1.06 unidades.
- **CASK de combustible:** Coeficiente de 0.7045 ($p = 0.037$), lo que sugiere que un aumento en el costo del combustible tiene un impacto considerable en el Yield. Este resultado subraya la importancia del combustible como componente crítico del CASK.
- **CASK no relacionado con el combustible:** Coeficiente de 0.3538 ($p = 0.157$). Aunque el efecto es positivo, no es estadísticamente significativo en este modelo, lo que indica que los aumentos en los costos no relacionados con el combustible pueden tener un impacto menor o menos directo en las tarifas aéreas.

El modelo presenta un R-cuadrado de 0.923, lo que significa que el 92.3% de la variabilidad en el Yield puede explicarse por los cambios en el CASK total, el CASK de combustible y el CASK no relacionado con el combustible.

Proyección del Yield Bajo Escenarios de Descarbonización

Para entender cómo la adopción de combustibles sostenibles de aviación (SAF) podría impactar las tarifas aéreas, se han comparado dos escenarios utilizando el modelo de regresión desarrollado: uno sin la adopción de SAF y otro con la adopción progresiva del SAF, ajustando los valores del CASK en consecuencia (gráfica 11). Para los costos adicionales de SAF se utilizaron los valores que arrojó la curva logística (% proporcional al costo total obtenido del estudio Waypoint 2050 de ATAG) para cada año a partir de 2030.

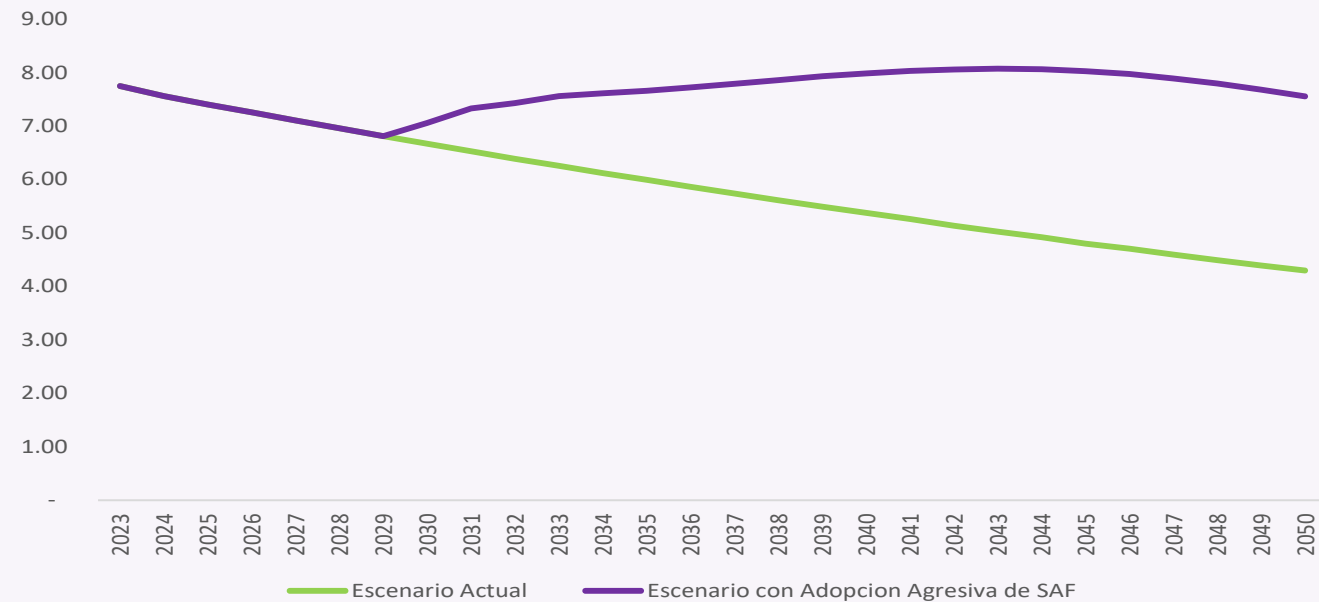
Escenario Actual: En este escenario, se utilizó el CASK proyectado sin considerar los costos adicionales asociados con el SAF. Los resultados indican que, bajo condiciones de operación estándar, el Yield experimentaría una reducción gradual a lo largo del período 2023-2050. Este descenso se explica por la esperada mejora en la eficiencia operativa y la reducción de costos operativos no relacionados con el combustible. Los supuestos asumidos en este escenario incluyen una reducción del 2% anual tanto en el CASK no relacionado con combustible como en el CASK relacionado con combustible. Además, se asume un precio estable del combustible convencional a futuro y un aumento en la capacidad del 3% anual.

Escenario con Adopción Agresiva de SAF: El segundo escenario integra el impacto del SAF en el CASK. Al incluir los costos adicionales del SAF (basado en el incremento anual a partir de 2030 según los costos obtenidos del estudio Waypoint 2050), se observa que el Yield proyectado es consistentemente más alto en comparación con el escenario actual. Esta diferencia refleja el traslado de los costos adicionales de descarbonización a los pasajeros. Los resultados muestran que, a medida que se incrementa la adopción del SAF, especialmente después de 2030, el Yield aumenta proporcionalmente. Este hallazgo subraya la sensibilidad de las tarifas aéreas al incremento en los costos operativos relacionados con la adopción de combustibles sostenibles.

Impacto en los Precios de los Boletos Aéreos

Estimación de Incremento en las Tarifas Aéreas

Gráfica 11.
Comparación de Ingresos por Pasajero
Kilometro de acuerdo con Escenarios
de Descarbonización

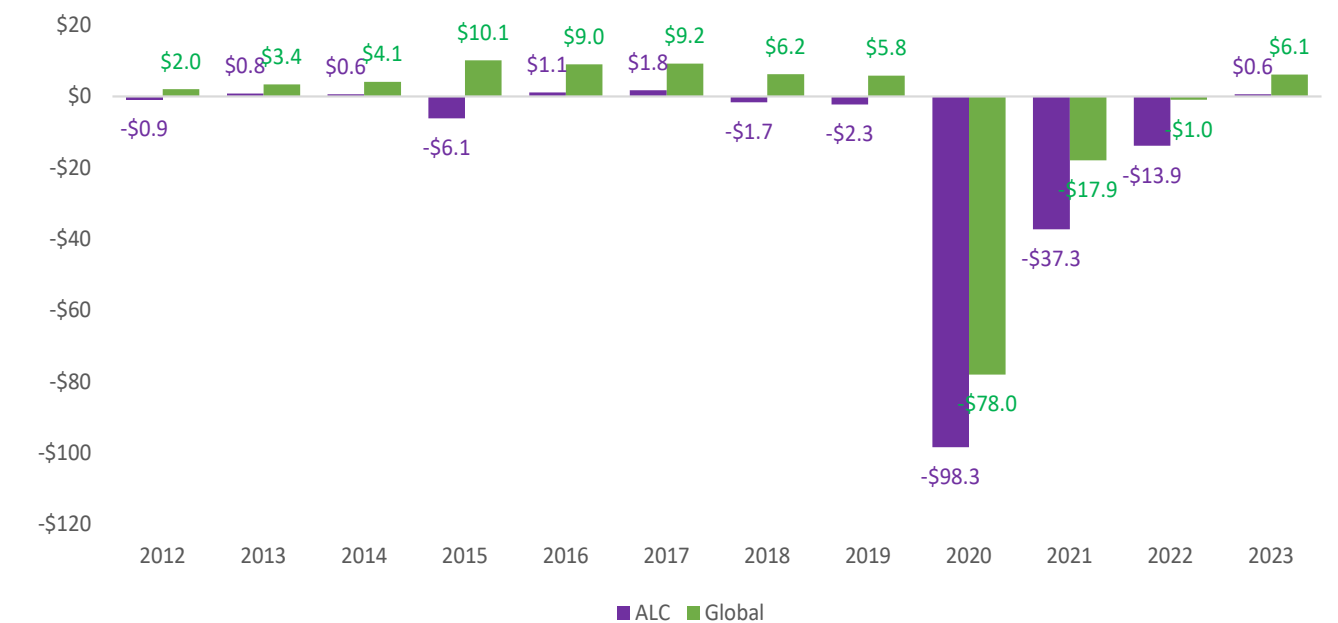


La diferencia entre ambos escenarios destaca el impacto económico que la descarbonización puede tener en las tarifas aéreas. Cabe destacar que estas proyecciones se basan en los supuestos y variables descritas anteriormente. Además, es importante mencionar que dichos supuestos no incluyen un posible aumento en el precio del carbono en los próximos años, inestabilidad en el precio del combustible Jet derivada de conflictos geopolíticos, costos adicionales por compensaciones de carbono (como los asociados a CORSIA u otros esquemas de Offsets), o los costos financieros y operativos relacionados con riesgos climáticos. Todos estos factores podrían afectar significativamente los márgenes operativos de las aerolíneas, incluso sin la adopción de SAF. Este modelo ha sido simplificado para comparar un escenario sin variables de descarbonización —salvo las mejoras en la eficiencia del combustible— frente a un escenario con adopción de SAF, pero no considera costos potenciales por la no acción climática.

También es importante tener en cuenta que las aerolíneas en América Latina y el Caribe ya enfrentan una situación de rentabilidad limitada, como se puede observar en la evolución del beneficio/pérdida neta por pasajero en comparación con el promedio mundial (gráfico 12). Esto evidencia que cualquier incremento en los costos operativos, como los relacionados con la descarbonización, tendría un impacto considerable en la capacidad de las aerolíneas para mantener su competitividad y accesibilidad en la región.



Gráfica 12.
Rentabilidad Neta por Pasajero



Durante los últimos años, las aerolíneas de la región han registrado márgenes de ganancia extremadamente bajos, e incluso pérdidas más pronunciadas que sus pares a nivel global. En este contexto, cualquier incremento en los costos, como los asociados con la adopción del SAF, no solo sería un desafío adicional, sino que también sería inevitable trasladar estos sobrecostos a los pasajeros para mantener la viabilidad económica. La comparación con el promedio global muestra que, en muchos casos, las aerolíneas de la región tienen menos margen para absorber costos adicionales sin ajustar las tarifas, lo que refuerza la necesidad de una estrategia de precios que refleje fielmente los costos operativos en aumento.

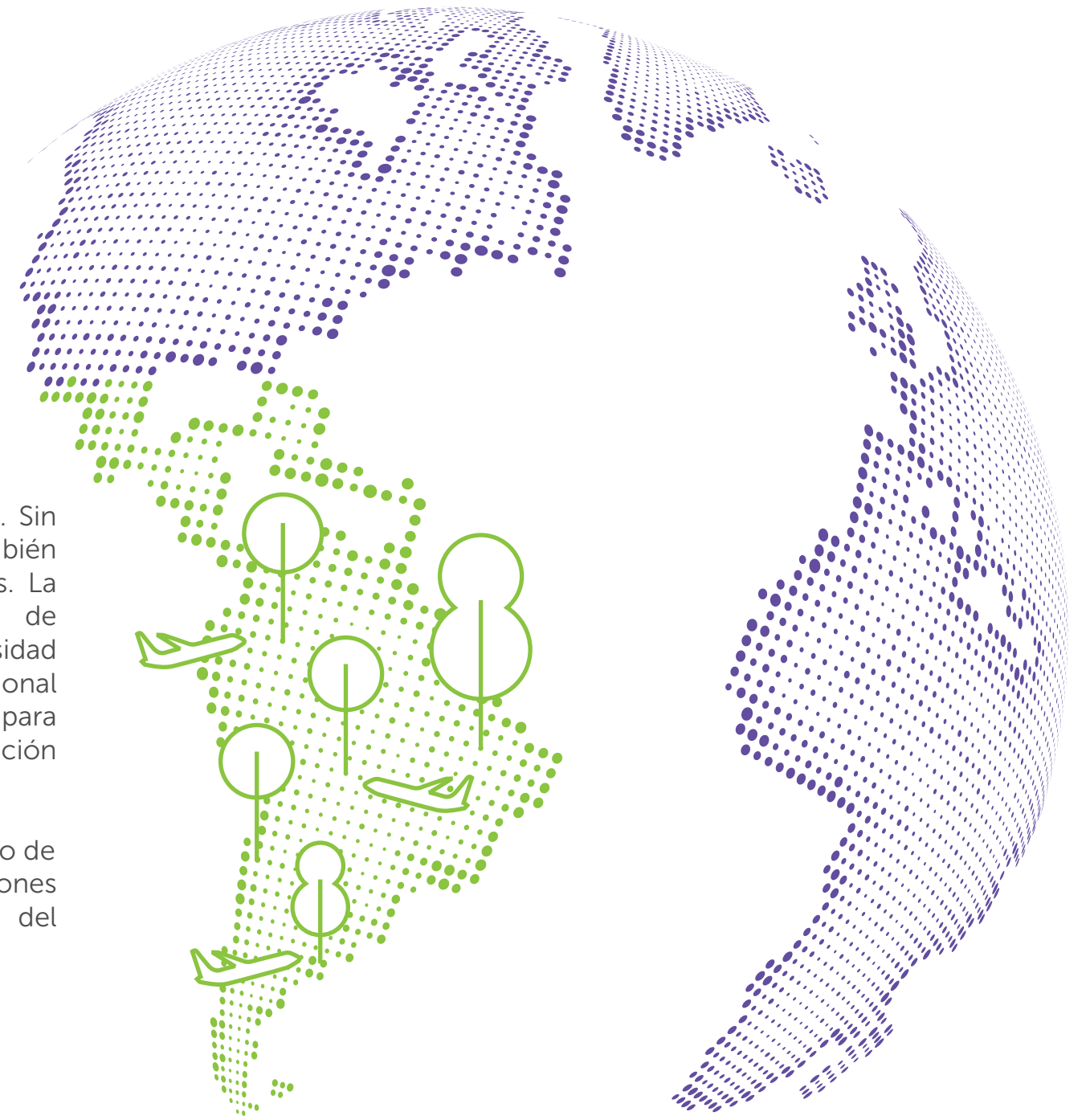
Desafíos y Recomendaciones para Alcanzar la Descarbonización de la Industria y Mayor Competitividad en los Precios del SAF

En línea con el objetivo de este documento de fomentar un enfoque colaborativo hacia el logro de los objetivos de aviación sostenible mientras se mantiene la accesibilidad y asequibilidad del transporte aéreo en América Latina, esta última sección pretende poner sobre la mesa una serie de recomendaciones y acciones que faciliten la consecución de dicho objetivo.

El desafío de descarbonizar la aviación en América Latina y el Caribe es considerable, especialmente considerando las características geográficas y

socioeconómicas únicas de la región. Sin embargo, estas características también presentan oportunidades significativas. La vasta biodiversidad, la abundancia de recursos naturales y la creciente necesidad de mejorar la conectividad regional proporcionan una base sólida para impulsar una transición hacia una aviación más sostenible.

A continuación, se detallan un conjunto de recomendaciones de diversas acciones que apoyarían la descarbonización del sector en la región.



Desafíos y Recomendaciones para alcanzar la Descarbonización de la Industria y Mayor Competitividad en los Precios del SAF

1. Fomentar múltiples caminos hacia la descarbonización:

Alcanzar las emisiones netas cero de carbono en la aviación es un reto complejo que exige un enfoque diversificado. En Latinoamérica, es esencial adoptar una estrategia que permita explorar y potenciar todas las vías disponibles para reducir las emisiones del sector. Esto incluye la promoción activa de combustibles sostenibles de aviación (SAF), que tienen el potencial de disminuir drásticamente las emisiones de CO₂. La región cuenta con una abundancia de recursos naturales que la posiciona favorablemente para liderar la producción mundial de SAF, especialmente en países como Brasil, uno de los productores más grandes de aceite de palma del mundo que tendría la capacidad de surtir el 34% de SAF de todo el planeta hasta 2030, además de su experiencia en el uso y generación de biodiesel con caña de azúcar [14]. México cuenta con acceso a materias primas como jatropha [15], algas y aceites usados, lo que le otorga un alto potencial para escalar la producción de SAF, mientras que Colombia, con su robusta producción de aceite de palma y caña de azúcar, está bien posicionado para aprovechar estos recursos en la generación de biocombustibles avanzados [16]. Chile que tiene el potencial de ser productor de hidrógeno verde y convertirse en uno de los principales exportadores mundiales para 2040 [17]. Por su parte, Perú y Ecuador tienen amplia disponibilidad de residuos agrícolas.

Además, se deben impulsar mejoras en la eficiencia operacional, tanto en aerolíneas como en aeropuertos y en la gestión del tráfico aéreo. Estas mejoras, como la optimización de rutas pueden ofrecer reducciones inmediatas de emisiones. Finalmente, es crucial fomentar el desarrollo de nuevas tecnologías, como aeronaves eléctricas o híbridas, y los mecanismos de mercado, como las compensaciones, para abordar las emisiones que no puedan ser eliminadas por otros medios (ver anexo 2).

2. Establecer un marco regulatorio con metas claras y consistentes:

La transición hacia una aviación sostenible en Latinoamérica requiere un marco regulatorio robusto que ofrezca certeza jurídica y promueva la inversión a largo plazo. Las políticas públicas deben ser coherentes y estar alineadas con los compromisos globales asociados a la reducción de emisiones de gases efecto invernadero. Es importante que estas políticas no solo se enfoquen en la descarbonización, sino que también consideren el impacto en el crecimiento económico y en la accesibilidad del transporte aéreo.

Para lograr esto, es esencial que los gobiernos promuevan la creación de esquemas de carbono que incluyan la certificación de créditos de carbono. Estos créditos deben ser parte de un enfoque más amplio que permita a las aerolíneas compensar sus emisiones de manera efectiva mientras se desarrollan nuevas tecnologías y se escala la producción de SAF. En este sentido, los gobiernos deben emitir cartas de autorización que certifiquen que los créditos de carbono pueden ser utilizados en programas como CORSIA, garantizando que no se duplique la contabilización de esas reducciones de emisiones. Además, sería beneficioso que las aerolíneas pudieran retirar los créditos aprobados bajo el programa CORSIA, garantizando transparencia y alineación con compromisos internacionales como el Acuerdo de París y los principios del Artículo 6.

Finalmente, en lugar de imponer mandatos que aumentarán los costos, es preferible que las políticas públicas incluyan incentivos que hagan más viable económicamente la adopción de estas tecnologías. Esto permitiría una transición más gradual y menos disruptiva para la industria, fomentando una adopción sostenible de las medidas necesarias.

3. Asegurar un crecimiento sostenible que potencie la competitividad regional:

El desarrollo de una aviación sostenible en Latinoamérica debe ser visto no solo como una necesidad ambiental, sino también como una oportunidad para impulsar el crecimiento económico y mejorar la competitividad regional. La aviación es un motor clave para la economía de la región, y su crecimiento sostenible es esencial para maximizar los beneficios socioeconómicos, como la generación de empleo y la mejora de la conectividad.

El desarrollo del SAF en la región representa una oportunidad significativa para crear empleo y estimular el crecimiento económico a lo largo de la cadena de suministro. De acuerdo con el estudio de ICF Fueling Net Zero (2021), las inversiones en bioenergía son altamente efectivas para generar empleo. Entre 2010 y 2019, se invirtieron 151 mil millones de dólares en capacidad de bioenergía y biocombustibles, lo que generó 3.58 millones de empleos en 2020, equivalentes a más de 23 empleos por cada millón de dólares invertido. Esto es significativamente superior a otros sectores como la energía solar (2.7 empleos por millón) y la energía eólica (1.1 empleos por millón). Estos datos resaltan el enorme potencial económico que la producción y expansión del SAF podría tener en Latinoamérica, tanto en términos de descarbonización como de desarrollo económico.

Es fundamental que las medidas de descarbonización no limiten el acceso al transporte aéreo ni incrementen los costos al punto de restringir la conectividad. Con una colaboración adecuada entre el sector público y privado, Latinoamérica puede liderar la adopción de nuevas tecnologías y la producción de SAF, posicionándose como un referente global en la aviación sostenible,

Desafíos y Recomendaciones para alcanzar la Descarbonización de la Industria y Mayor Competitividad en los Precios del SAF

mientras se mantiene la accesibilidad económica del transporte aéreo. Esta colaboración debe enfocarse en crear un entorno propicio para la innovación y el desarrollo de soluciones que no solo contribuyan a la reducción de emisiones, sino que también promuevan el crecimiento económico y la seguridad energética en la región.

A continuación, se ofrecen recomendaciones esenciales dirigidas a aerolíneas, gobiernos y actores del ecosistema involucrado en la adopción del SAF, con el objetivo de garantizar que su precio sea competitivo de cara a 2050..

• **Fondos de inversión colaborativos:** Crear fondos de inversión mediante la colaboración entre aerolíneas, aeropuertos, inversores, arrendadores, fabricantes de aviones y motores, y grandes empresas comprometidas con la reducción de emisiones, para financiar proyectos innovadores en las primeras etapas de producción de SAF.

Por ejemplo:

- Schiphol ofrece hasta 500€ por tonelada de SAF y hasta 1000€ por tonelada de combustibles sintéticos, con un tope de 2.5 M€ en subsidios, exigiendo previsiones de uso de SAF para el próximo año (Schiphol Airport – Charges and Conditions 2022).
- Heathrow tiene un esquema de subsidios de 533€ por tonelada de SAF, con un tope de 11.6 M€, incentivando a las aerolíneas a través de reducciones de cargos por emisiones de NOx (Heathrow SAF Incentive, 2021).
- Milan Airports proporciona hasta 500€ por tonelada de SAF con un tope de 450 K€ para 2023 (SEA Milan Airports, 2023).

• Dusseldorf Airport ofrece un subsidio de 250€ por tonelada de SAF, sin límite superior, con un máximo de 1000 toneladas por repostaje (Duesseldorf Airport – Tariff Regulations).

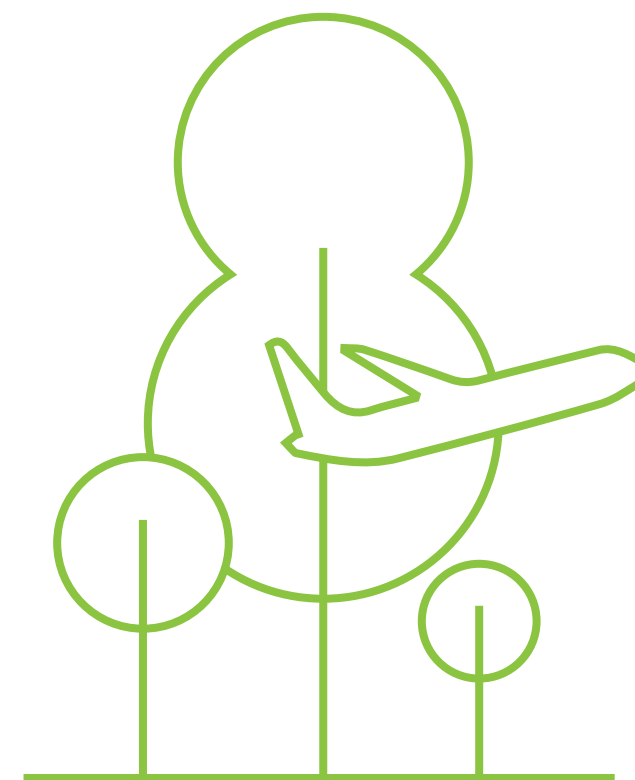
• **Impulsar la inversión en infraestructura:** Promover la participación de inversores en infraestructura a largo plazo para la producción, almacenamiento y distribución del SAF en Latinoamérica, así como en la implementación de proyectos piloto. Es importante priorizar que los SAF producidos cuenten con certificaciones necesarias para ser elegibles en el marco de CORSIA, para permitir a las aerolíneas reclamar reducciones de emisiones.

• **Desarrollar un entorno regulatorio favorable:** Los gobiernos de Latinoamérica deben crear un entorno regulatorio que facilite el desarrollo de la infraestructura de SAF, mediante normativas que agilicen las inversiones, permisos acelerados, incentivos fiscales y marcos legales claros que reduzcan la incertidumbre para los inversores, incluyendo acuerdos comerciales que faciliten la exportación e importación de SAF y tecnologías relacionadas. No se debe desarrollar una política donde se obligue a las aerolíneas a comprar o utilizar cierta cantidad de dicho SAF (mandatos).

• **Incluir materias primas y mediciones regionales en esquemas internacionales:** Los países de la región deben trabajar para que las materias primas y las mediciones de Análisis del Ciclo de Vida (LCA) de la región sean reconocidas en los esquemas internacionales, como CORSIA. Esto garantizará que las oportunidades de la región se incluyan en los mercados globales de SAF, fomentando un comercio más justo y una mayor competitividad internacional.

• **Apoyar la innovación en materias primas:** Establecer programas de apoyo e incentivos para la producción, investigación y desarrollo de nuevas fuentes de materia prima para SAF que sean más abundantes y sostenibles en la región, como residuos agrícolas y forestales, incluyendo subsidios para agricultores y mejoras en la infraestructura logística.

• **Integración de energías renovables:** Aumentar la integración de energías renovables en los procesos de producción de SAF, utilizando electricidad de fuentes renovables para reducir los costos energéticos y disminuir las emisiones asociadas con la producción.



Anexo 1: Estado actual del Combustible Sostenible de Aviación (SAF) y perspectivas hacia 2050

Alcanzar los objetivos de descarbonización del sector aéreo para 2050 dependerá de una combinación de medidas, que incluyen la adopción de combustibles sostenibles de aviación (SAF), nuevas tecnologías energéticas, la optimización operativa y el uso de compensaciones de carbono, entre otras.

Es importante tener en cuenta que las características y el contexto de desarrollo varían en cada país, por lo que las soluciones deberán adaptarse a las necesidades específicas de cada mercado. Las compensaciones de carbono, por ejemplo, pueden ofrecer una herramienta a corto plazo en regiones donde la adopción de tecnologías más limpias sea más lenta, permitiendo la mitigación de emisiones a través de proyectos como la reforestación.

Aunque el SAF será un componente importante de la estrategia de descarbonización, es necesario combinarlo con otras soluciones tecnológicas y operativas, tomando en cuenta los diferentes contextos de desarrollo de los países de la región. Según los escenarios del Long-Term Aspirational Goal (LTAG) de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), las reducciones de emisiones varían dependiendo de las estrategias combinadas. Bajo el escenario IS1, se proyecta una reducción del 20% en las emisiones gracias a tecnologías de aeronaves, un 4% mediante mejoras operativas y un 15% a través de combustibles más limpios para 2050. En el escenario IS2, las reducciones podrían llegar al 21% con nuevas tecnologías, 6% con operaciones más eficientes, y un 41% a través de combustibles alternativos.

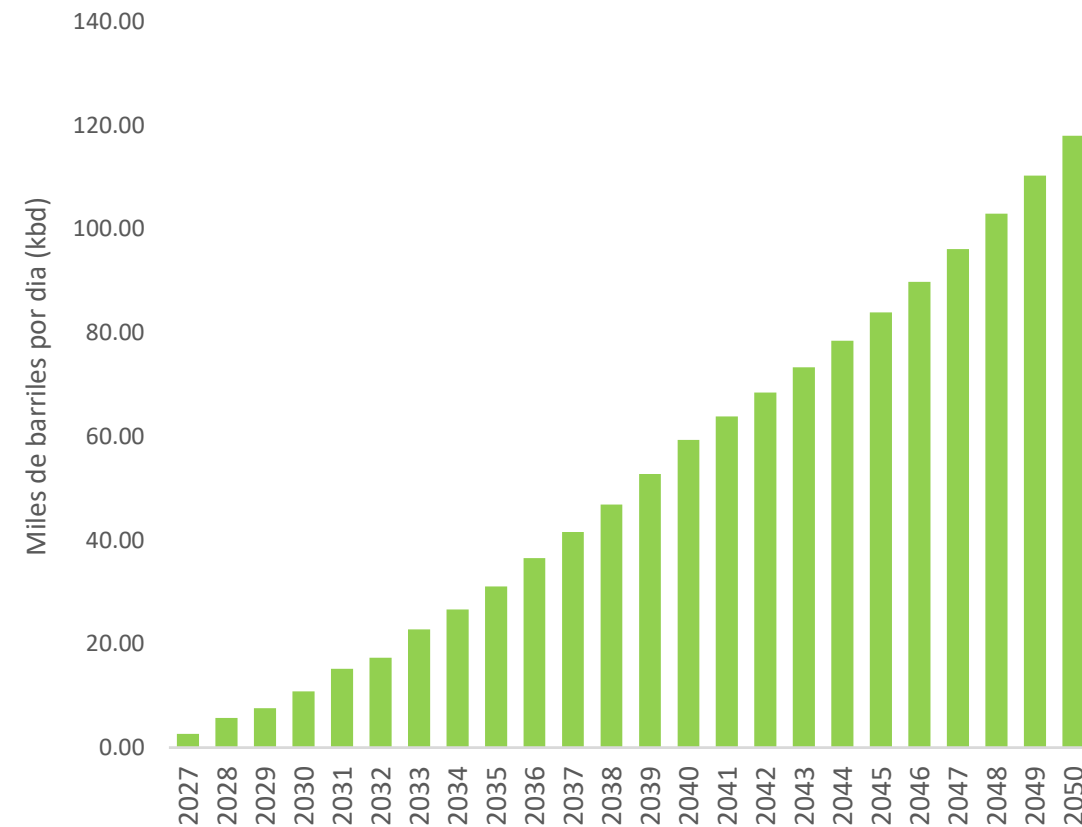
Finalmente, el escenario más ambicioso, IS3, proyecta una reducción del 21% en emisiones debido a las tecnologías de aeronaves, 11% por eficiencia operativa, y un 55% con el uso de combustibles alternativos como el hidrógeno.



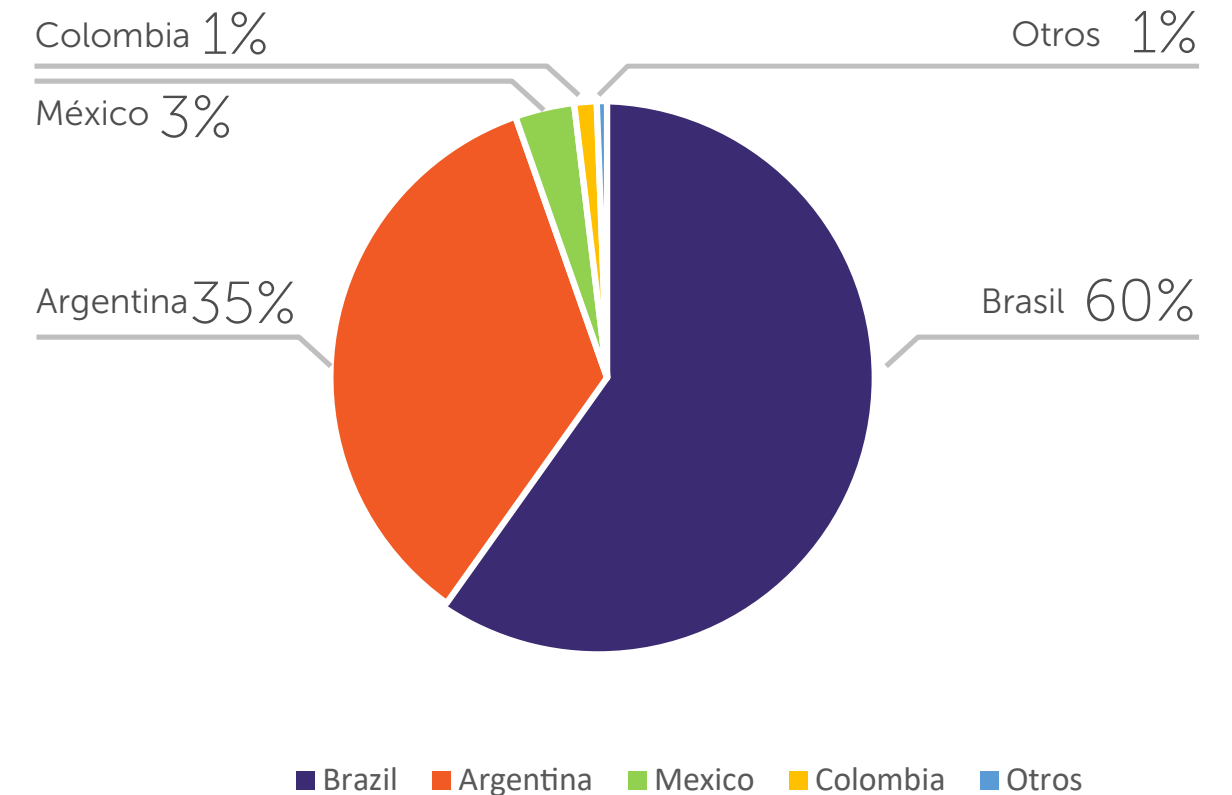
Anexo 1: Estado actual del Combustible Sostenible de Aviación(SAF) y perspectivas hacia 2050

Este anexo se enfoca en mostrar el estado actual del SAF en la región y el panorama futuro, utilizando datos de S&P Global. Según sus proyecciones, bajo las tendencias actuales, la oferta total de combustibles sostenibles de aviación (SAF) en Latinoamérica y el Caribe alcanzará 118.000 barriles/día en 2050, con una tasa de crecimiento compuesta anual (CAGR) del 18% en los próximos 25 años (gráfica 13). Se estima que Brasil representará al menos el 60% del total de esta oferta regional (gráfica 14).

Gráfica 13.
Proyección del suministro de SAF
para América Latina (2027-2050)



Gráfica 14.
Participación por país de la oferta
total proyectada de SAF en ALC (2050)



Fuente: Análisis de ALTA basado en S&P Global Commodity Insights. © 2024 S&P.

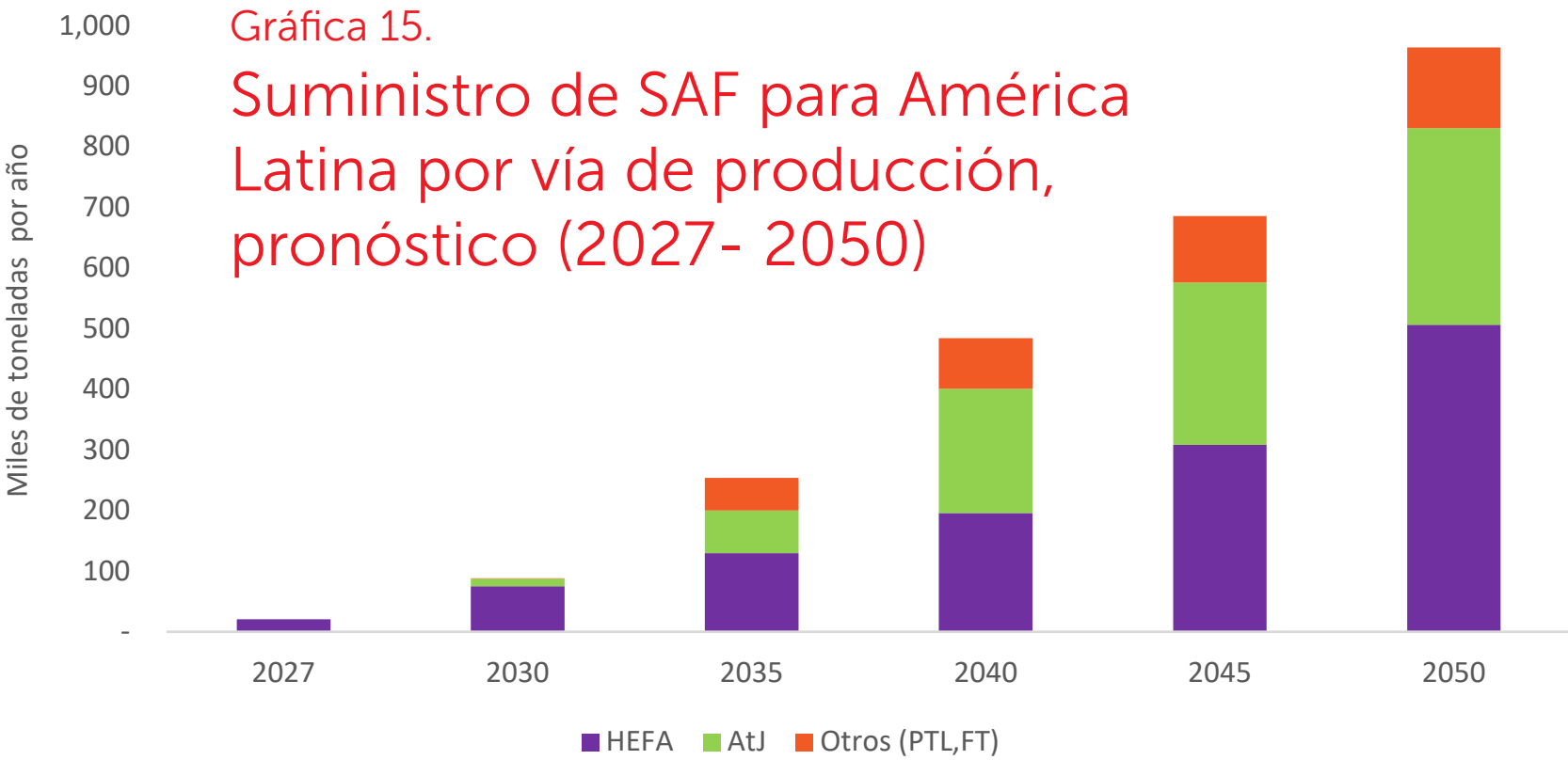
Según S&P Global, las proyecciones sobre la oferta de SAF en la región (gráfica 13) prevén un crecimiento sostenido en la producción hasta 2050. El método de producción mediante Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA) seguirá siendo el más relevante, representando más del 50% del suministro total en ese año. No obstante, a partir de 2030, se espera un incremento notable en la participación de la tecnología Alcohol-to-Jet (AtJ), que alcanzará 39.6 mil barriles diarios en 2050, impulsada por la mayor disponibilidad de materias primas de baja intensidad de carbono, como el etanol en países como Brasil, donde la industria a partir de caña de azúcar será clave en esta transición. Esto sugiere que América Latina comenzará a diversificar sus fuentes de producción de SAF, disminuyendo su dependencia de HEFA. La diversificación de las tecnologías de producción será esencial para cubrir la creciente demanda, aprovechando los abundantes recursos agrícolas y energéticos de la región. A medida que estas tecnologías avancen, se volverán más accesibles y eficientes.

Anexo 1:
Estado actual
del Combustible
Sostenible de
Aviación(SAF)
y perspectivas
hacia 2050

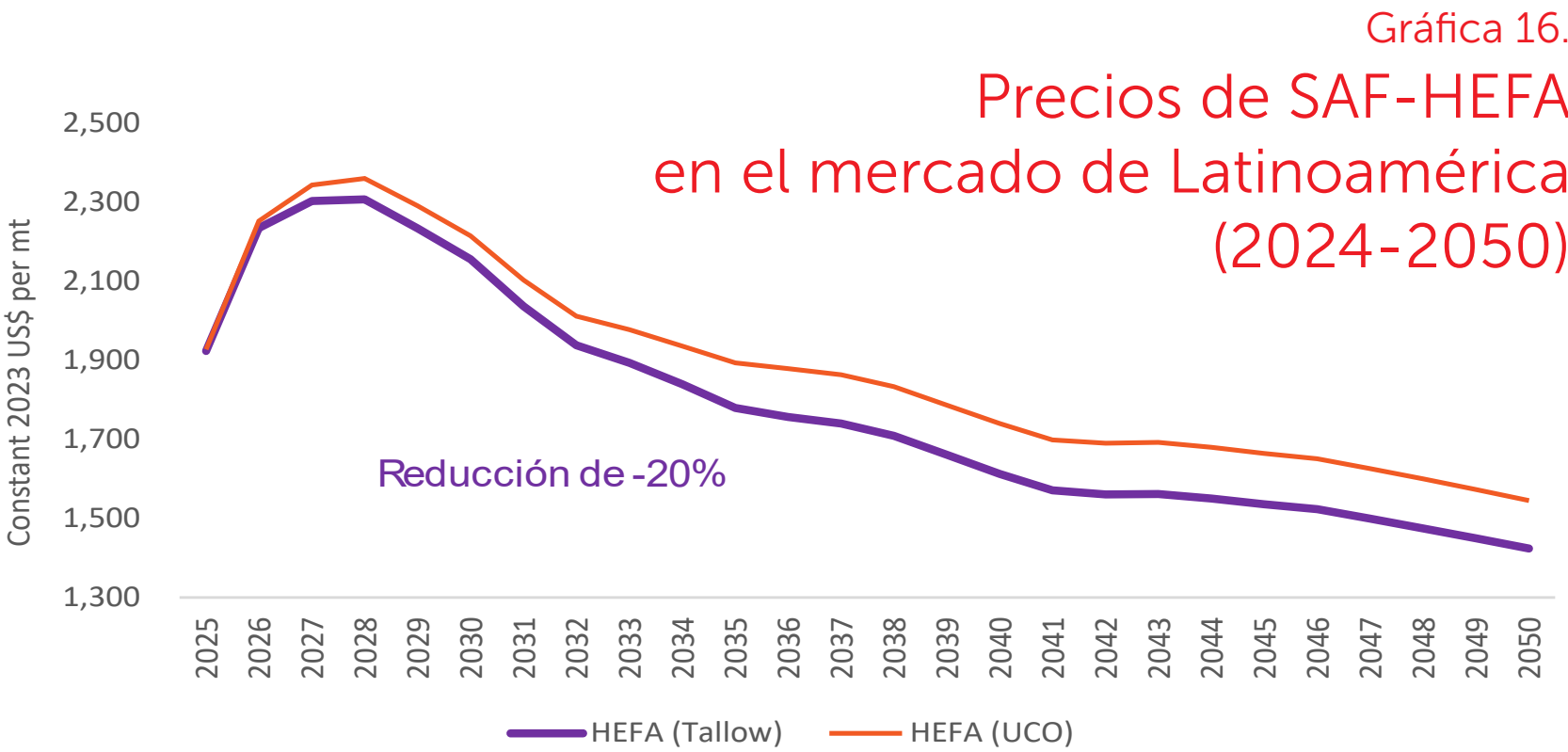


Actualmente, el SAF producido a través de la vía HEFA (Ésteres y Ácidos Grasos Hidroprocesados) tiene un costo entre 2 a 5 veces mayor que el combustible fósil convencional (gráfica 16). Aunque se espera que los precios disminuyan con innovaciones tecnológicas y economías de escala, estos costos dependen en gran medida del método de producción y la materia prima utilizada. El proceso HEFA es solo una de las varias rutas para la producción de SAF, y no todas enfrentan las mismas condiciones. Otras rutas, como la gasificación de biomasa o los combustibles sintéticos, pueden tener costos diferentes y enfrentar desafíos específicos según los recursos y capacidades disponibles en cada región.

A medida que la producción se expanda y las tecnologías se perfeccionen, algunos insumos, como la electricidad renovable, serán más accesibles. Sin embargo, es fundamental destacar que no existe una materia prima o método de producción que sea universalmente viable para satisfacer la demanda global de SAF, y las características y contextos regionales jugarán un papel clave en el desarrollo de las distintas vías de producción.



Fuente: Analisis de ALTA basado en datos de S&P Global Commodity Insights. © 2024 S&P. Notas: HEFA: Hydroprocessed Ester Fatty Acids, ATJ: Alcohol-to-Jet, FT: Fischer Tropsch, PTL: Power-to-liquid



Fuente: Análisis de ALTA basado en datos de S&P Global Commodity Insights. © 2024 S&P . Nota: Los precios presentados son calculados utilizando el método net-back desde los EE. UU.

Anexo 2: Mercados y Mecanismos de Reducción de Carbono

A pesar de los avances en tecnología, las mejoras operativas y en infraestructura, y el creciente uso de Combustible Sostenible de Aviación (SAF) en el futuro, seguirán existiendo emisiones remanentes que no podrán ser completamente eliminadas para 2050. Para mitigar estas emisiones será crucial invertir en medidas de reducción de carbono fuera del sector. El Anexo 2, explora brevemente el papel de los mercados de créditos de carbono y resalta la necesidad de inversión en energías renovables como estrategias complementarias para alcanzar los objetivos de reducción de emisiones. Estas estrategias incluyen:

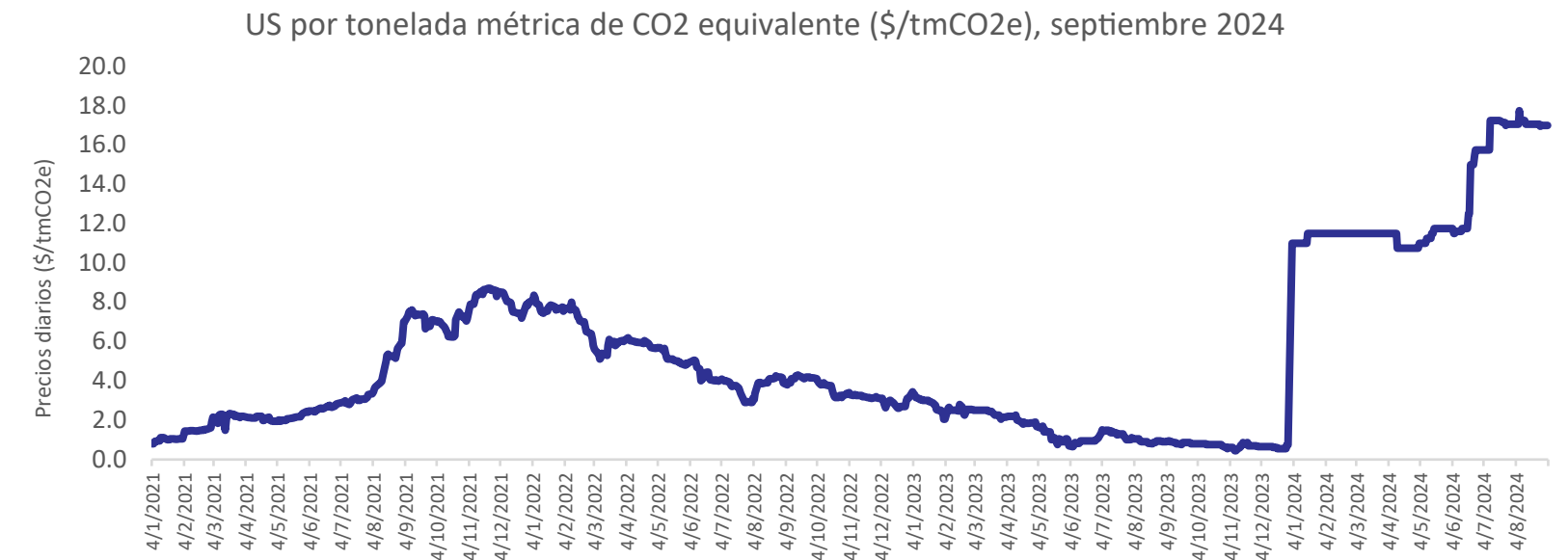
- **Compensación de carbono:** Adquisición de créditos de carbono provenientes de proyectos que reducen, capturan o previenen emisiones fuera de la aviación. Ejemplos incluyen reforestación, proyectos de energías renovables y captura de metano.
- **Captura y almacenamiento de carbono (CCS):** Inversión o apoyo en tecnologías que capturan CO₂ de procesos industriales o directamente de la atmósfera, almacenándolo en depósitos subterráneos o reutilizándolo en otros sectores.
- **Inversión en energías renovables:** Financiar el desarrollo de infraestructuras de energías limpias, como la solar, eólica o geotérmica, para reducir la dependencia de combustibles fósiles en otros sectores.

El uso de la compensación de carbono ya sea mediante mecanismos de mercado y reducciones fuera del sector, puede formar parte de la estrategia para alcanzar los objetivos de la industria, según el costo de las compensaciones disponibles en ese momento (gráfica 17), en comparación con la oferta de Combustible Sostenible de Aviación (SAF) y la diferencia de precio entre estos y el combustible convencional para aviones. El mercado voluntario de créditos de carbono se proyecta que crezca significativamente en los próximos años, aunque existen pocas previsiones e incertidumbre respecto a la disponibilidad y los tipos de compensaciones que existirán en 2050.

La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) ha establecido el Esquema de Compensación y Reducción de Carbono para la Aviación Internacional (CORSIA por sus siglas en ingles), con el objetivo de limitar las emisiones del sector a partir de 2021. Aunque se espera que las aerolíneas inviertan en diversas opciones para reducir sus emisiones, gran parte de estas reducciones se logrará mediante la adquisición de créditos de carbono voluntarios.



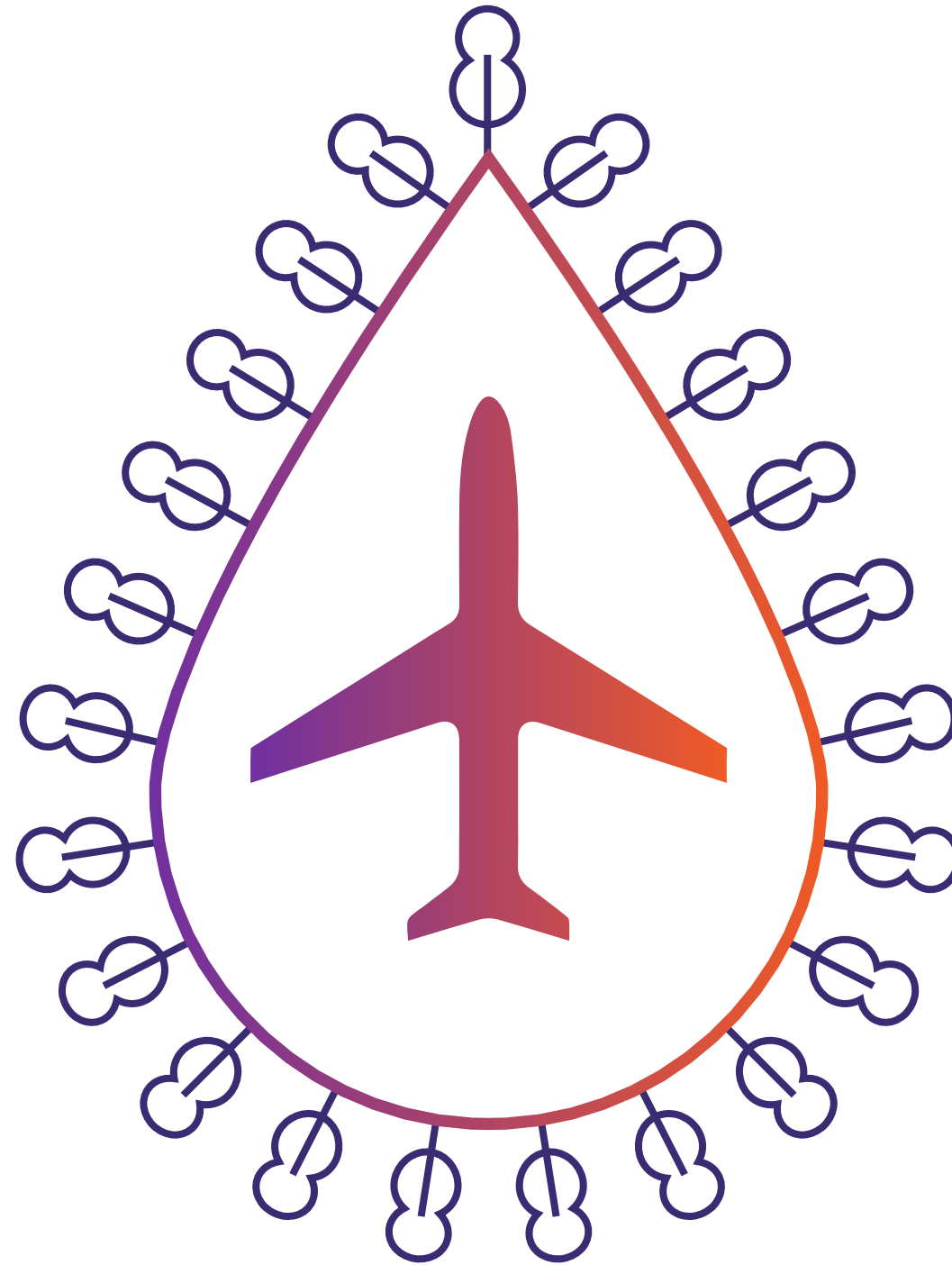
Gráfica 17. Precios diarios para mercado de créditos elegibles para CORSIA



Fuente: Análisis de ALTA basado en datos de S&P Global Commodity Insights. © 2024 S&P. Nota: Platts (CORSIA Eligible Credit) publica un precio diario en (\$/ mtCO₂e) y representa un mínimo de un lote de 20,000 unidades de tmCO₂e cada uno y un volumen máximo de 100 lotes de 1,000 unidades de tmCO₂e cada uno.

Anexo 3:

Mercados y Mecanismos de Reducción de Carbono



América Latina sigue siendo una región en crecimiento para la demanda de productos refinados. Se proyecta que la demanda de combustibles tradicionales, como gasolina, diésel y combustible para aviones, aumentará en las próximas décadas, aunque de manera moderada debido a la transición energética y mejoras en eficiencia. La demanda de combustible de aviación aún no ha alcanzado los niveles prepandemia, pero se espera que lo haga en 2024.

El anexo 3, ofrece un breve análisis sobre las perspectivas de la demanda total del combustible de aviación convencional, así como de la capacidad de producción, consumo y balance comercial de jet fuel en los principales países de América Latina y el Caribe, con el fin de comprender los desafíos y oportunidades que estos países enfrentan en su transición hacia la producción de Combustible Sostenible de Aviación (SAF). Esta información podría resultar relevante para identificar las brechas existentes entre la producción local y la creciente demanda de jet fuel, lo que subraya la importancia de desarrollar fuentes alternativas como el SAF, mejorar el balance comercial y fortalecer la autosuficiencia energética a largo plazo.

Anexo 3:
Mercados
y Mecanismos
de Reducción
de Carbono

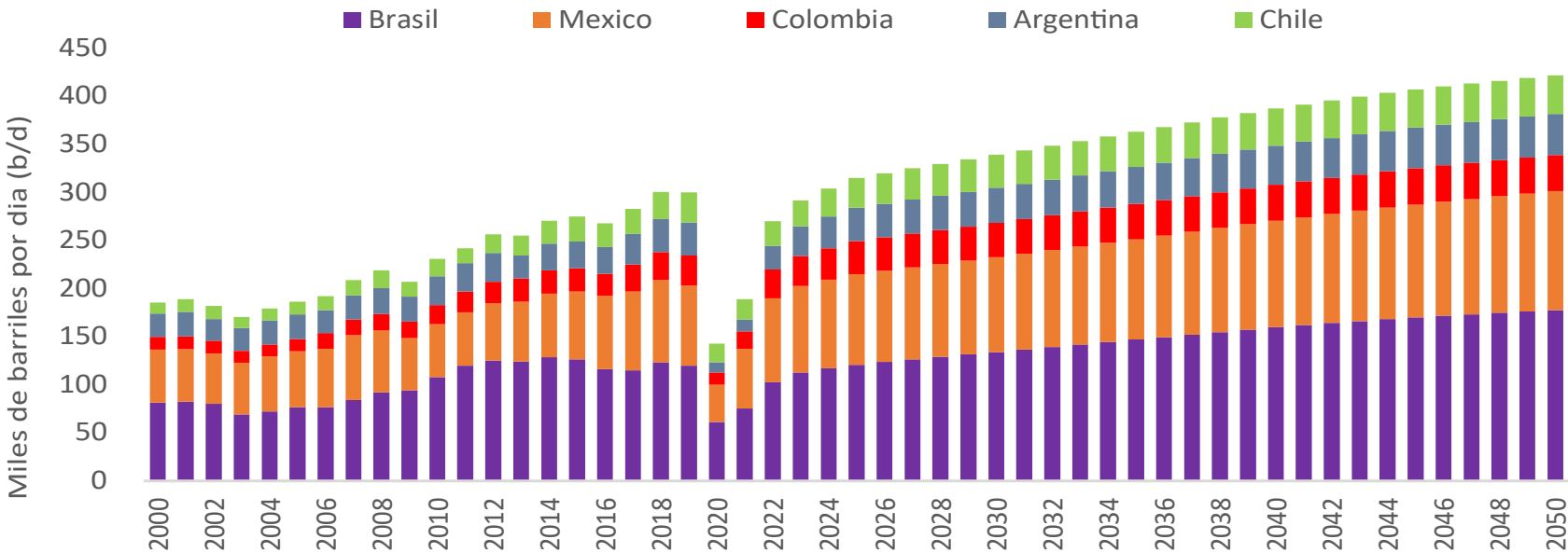
Demanda total de combustible de aviación de América Latina

Se proyecta que la demanda de combustibles de aviación para la región de América Latina y el Caribe alcanzara los 583.000 barriles/día, unidad expresada en adelante como (b/d). en 2050. La demanda proyectada en los 5 mercados principales (Brasil, México, Colombia, Argentina y Chile) experimentará una tasa de crecimiento compuesto anual (CAGR) del 1.38% desde 2023, alcanzando un total cercano a los 421.000 b/d para 2050, (gráfica 18 y 19).

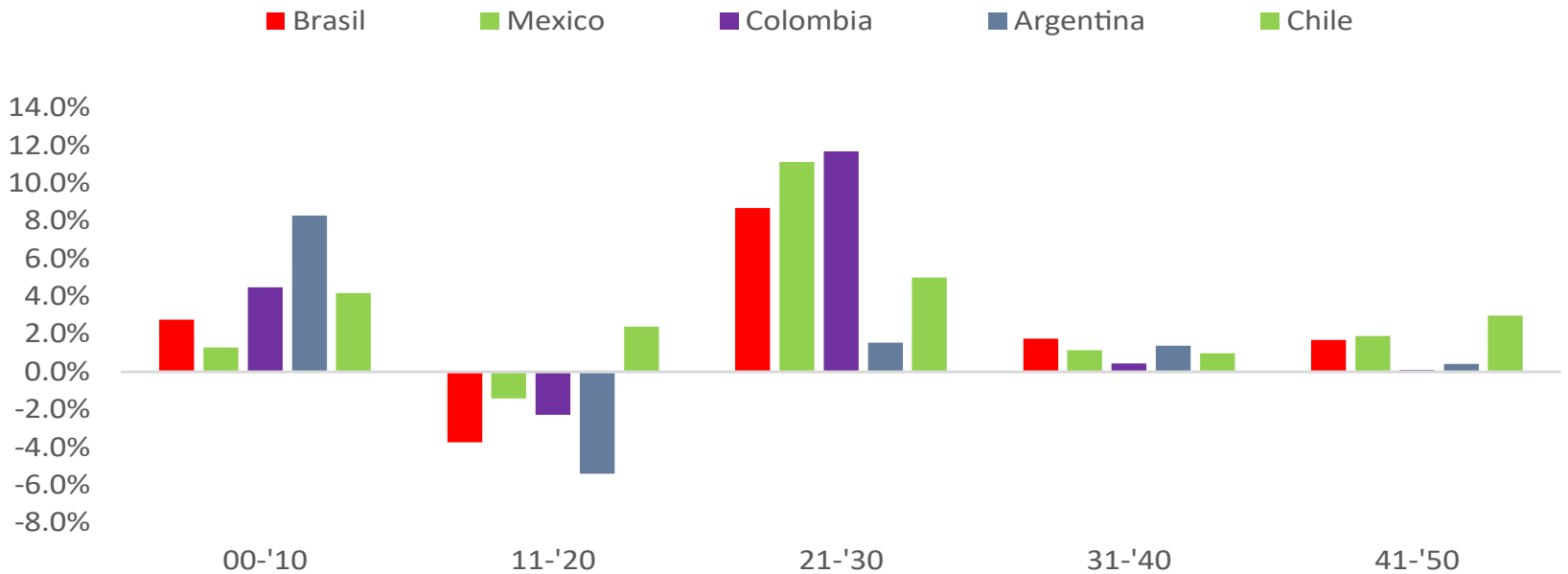
En 2023, según datos de S&P Global. El consumo de combustible de aviación en los principales países de la región fue el siguiente:

- Brasil: 113.000 b/d, con un CAGR de 1.7%.
- México: 90.000 b/d, con un CAGR de 1.2%.
- Colombia: 31.000 b/d, con un CAGR de 0.7%.
- Argentina: 31.000 b/d, con un CAGR de 1.2%.
- Chile: 27.000 b/d, con un CAGR de 1.5%.

Gráfica 18.
Consumo histórico y pronóstico de jet fuel para principales países en ALC (miles de b/d)



Gráfica 19.
Crecimiento promedio anual del consumo de jet fuel por país



Anexo 3:

Estado del Combustible de Aviación en la Región

Producción de combustible de aviación de América Latina

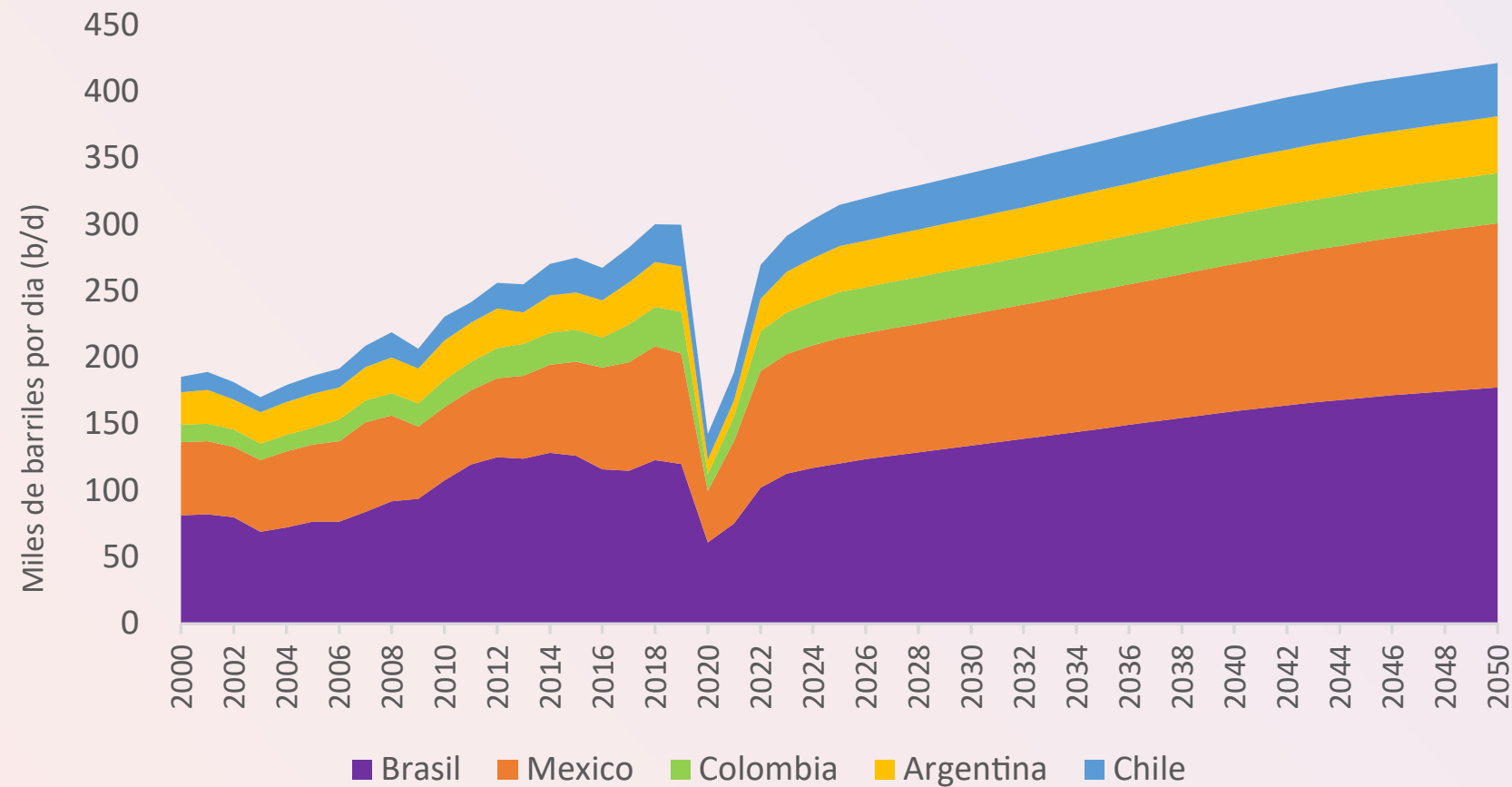
La capacidad de producción de combustible para aviación en la región alcanzará los 319.000 b/d en 2050, con un CAGR del 1.1% a partir de 2023 (gráfica 20).

En 2023, según la misma fuente, los principales países de la región registraron la siguiente producción de combustible para aviación:

- Brasil: 92.000 b/d, con un CAGR de 1.5%.
- México: 36.000 b/d, con un CAGR de 2.6%.
- Colombia: 27.000 b/d, con un CAGR de -0.1%.
- Argentina: 31.000 b/d, con un CAGR de -0.8%.
- Chile: 13.000 b/d, con un CAGR de -0.3%.

Dado que la capacidad de producción de jet fuel en la mayoría de estos países no es suficiente para satisfacer la demanda futura, la región continuará dependiendo de importaciones. Esto impacta directamente en su seguridad energética, exponiéndolos a variaciones en precios internacionales y posibles interrupciones en el suministro.

Gráfica 20.
Capacidad histórica y pronóstico de producción de combustible aviación por país



Fuente: Análisis de ALTA basado en datos de S&P Global Commodity Insights. © 2024 S&P.



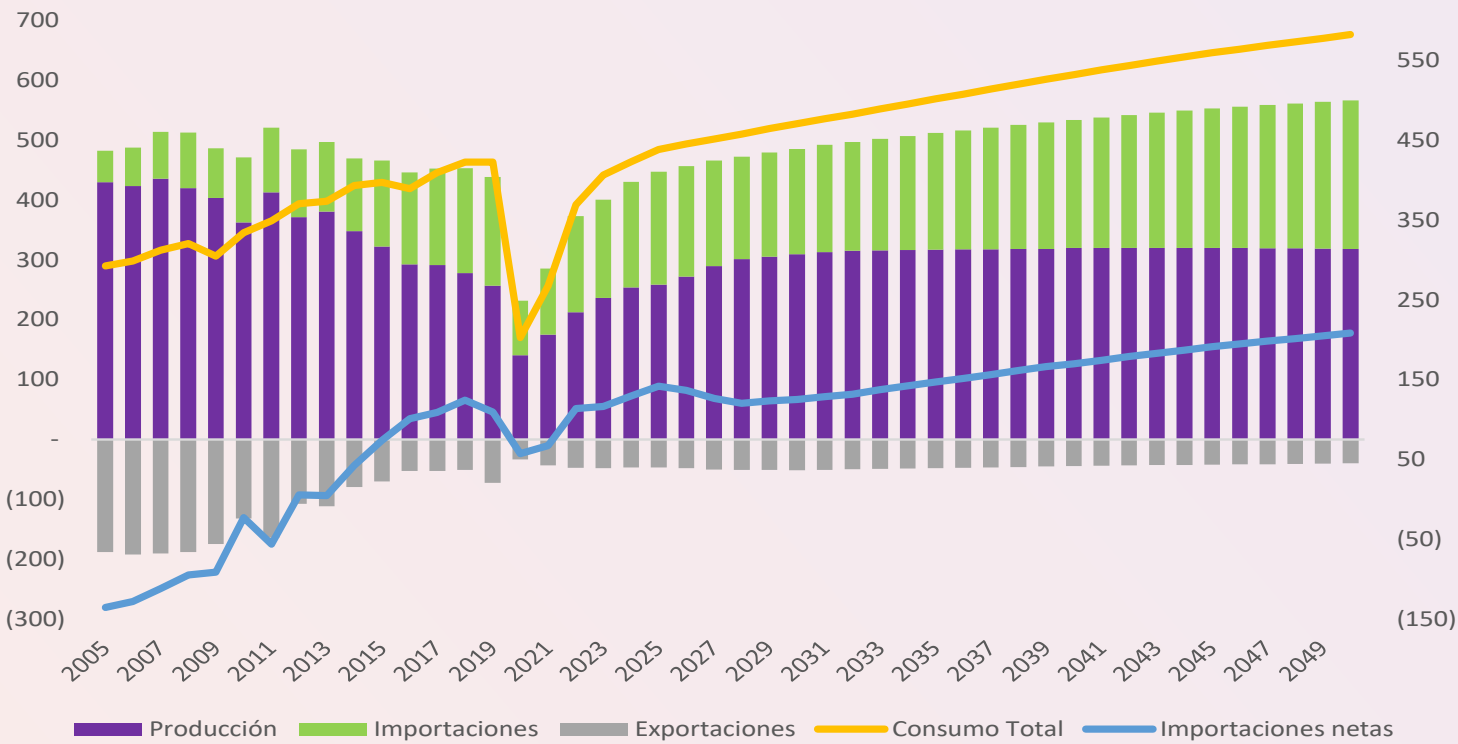
Anexo 3:
Estado del
Combustible
de Aviación
en la Región

Balance comercial histórico
y perspectivas a 2050, por país

El consumo de jet fuel en América Latina y el Caribe seguirá con una tendencia creciente a lo largo de las décadas, superando la producción local de manera sostenida, lo que destaca una creciente dependencia de las importaciones. Esta brecha entre producción y demanda refleja una vulnerabilidad en la seguridad energética, ya que la región debe abastecerse externamente para cubrir sus necesidades (gráfica 21).

Aunque las importaciones netas comienzan a estabilizarse y disminuir hacia 2040, esto sugiere que se proyecta una cierta mejora en la producción local, pero sigue habiendo una fuerte dependencia de fuentes externas para satisfacer la demanda creciente.

Gráfica 21.
Balance comercial de jet fuel
en ALC (2005-2050)



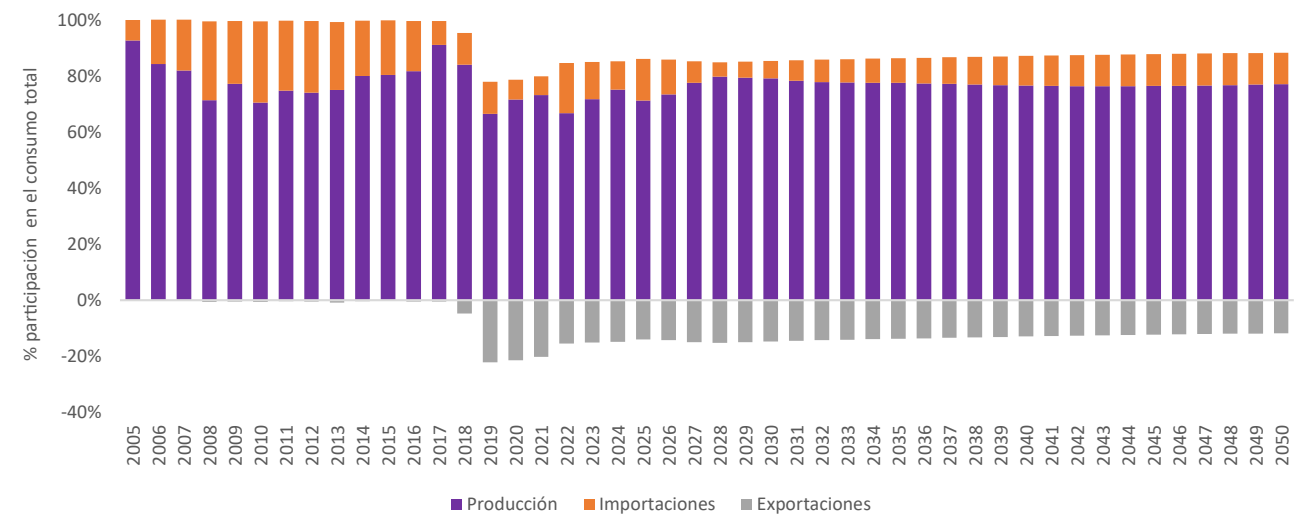
Fuente: Análisis de ALTA basado en datos de S&P Global Commodity Insights. © 2024 S&P.



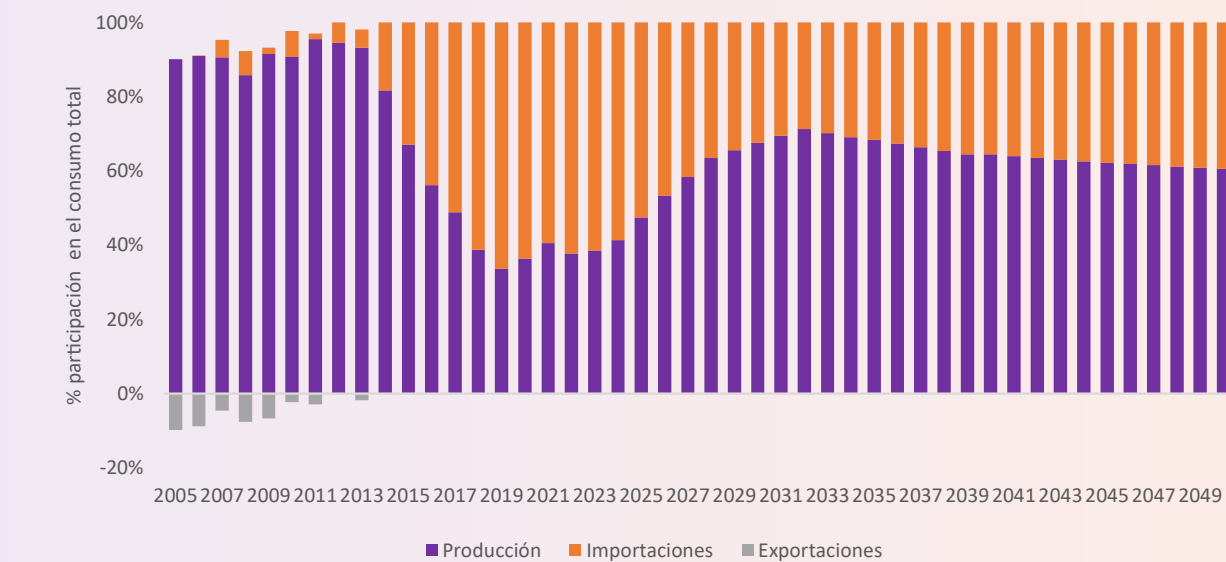
Anexo 3:
Estado del
Combustible
de Aviación
en la Región

A continuación, se muestra el balance comercial y la producción del combustible de aviación histórico y el pronóstico hacia 2050, para la región y los principales países de la región (gráficas 22-26).

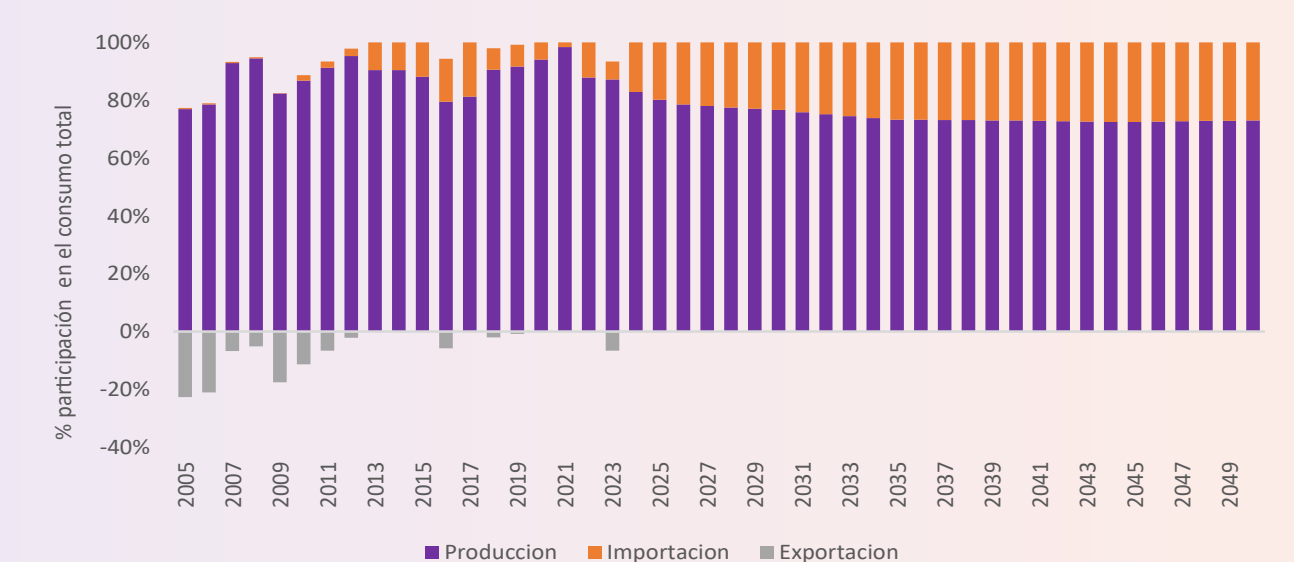
Gráfica 22.
Balance de jet fuel— Brasil



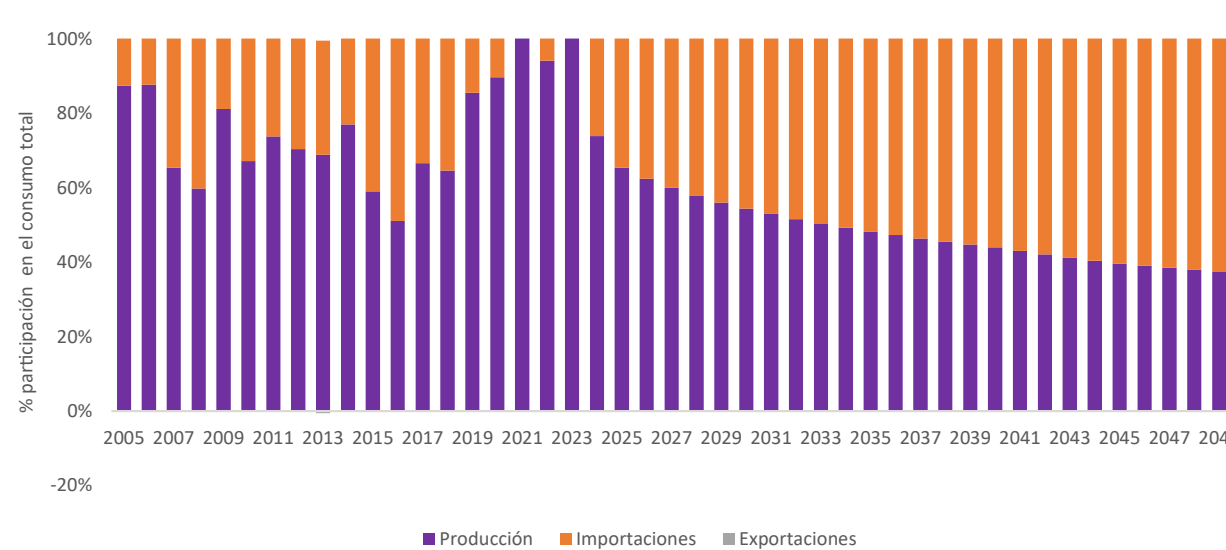
Gráfica 23.
Balance de jet fuel— México



Gráfica 24.
Balance de jet fuel— Colombia

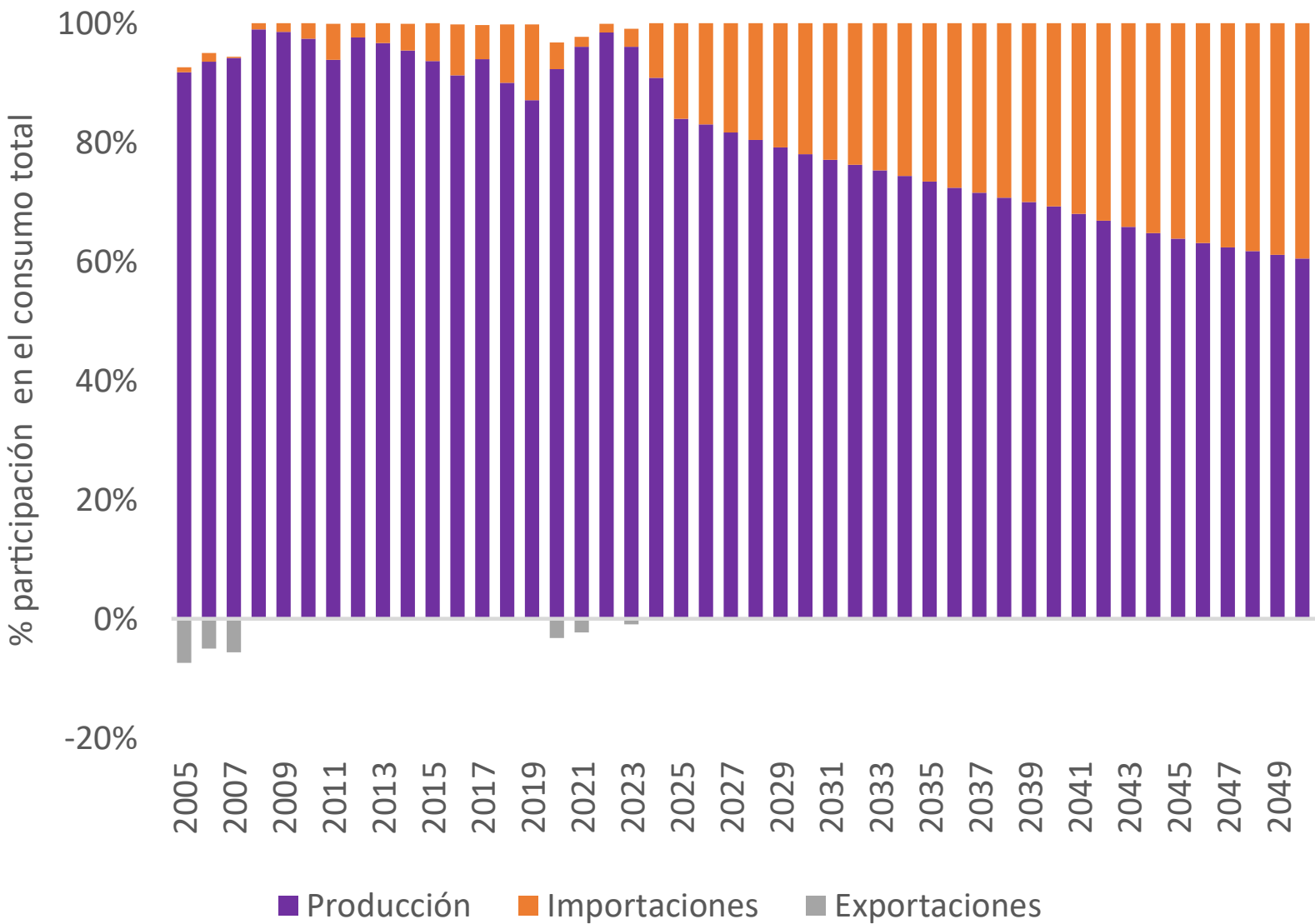


Gráfica 25.
Balance de jet fuel— Chile



Anexo 3:
Estado del
Combustible
de Aviación
en la Región

Gráfica 26.
Balance de jet fuel— Argentina

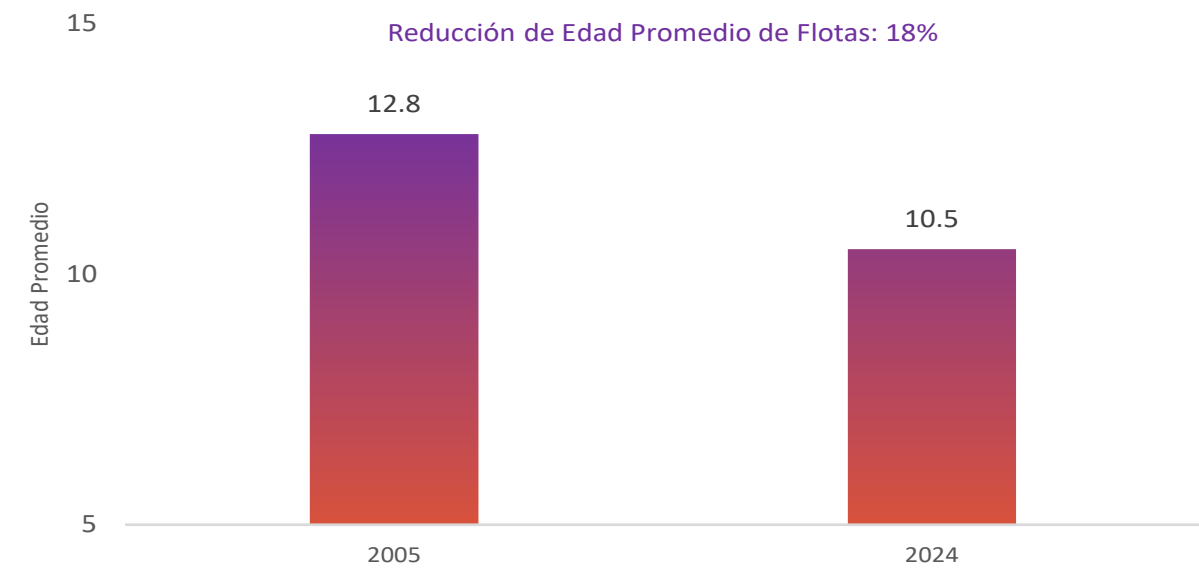


Analisis de ALTA basado en datos de S&P Global Commodity Insights. © 2024 S&P.



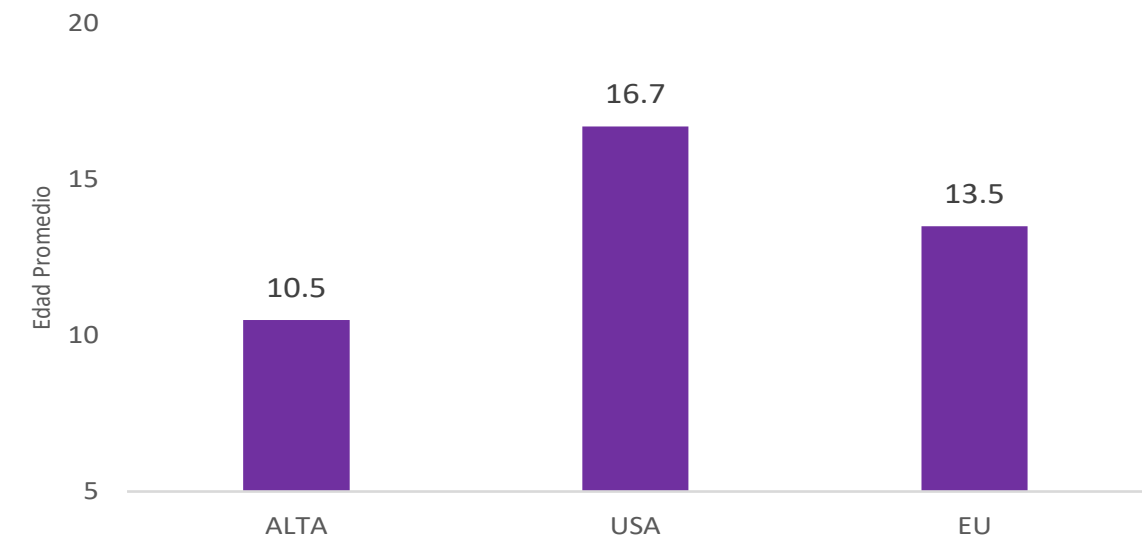
Anexo 4:
Renovación
de Flota y
Densificación
de Cabina en la
Región

Gráfica 27.
Edad Promedio de Flotas (Aerolíneas ALTA)



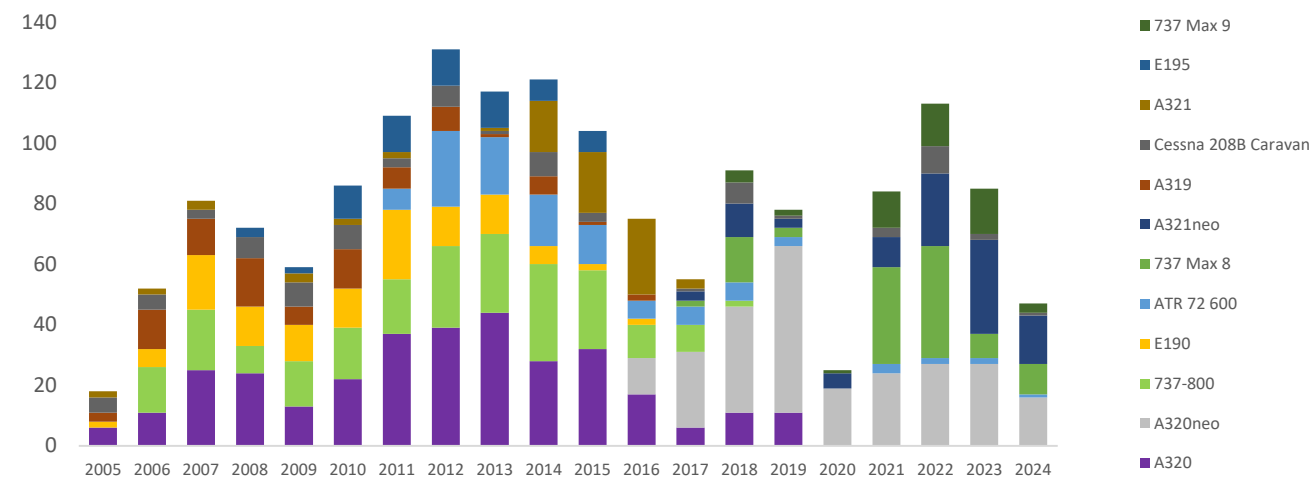
Fuente: Análisis de ALTA basado en CIRIUM

Gráfica 28.
Comparación de Edad Promedio
de Flotas (2023)



Fuente: Análisis de ALTA basado en CIRIUM

Gráfica 29.
Nuevos aviones en servicio
por tipo de avión

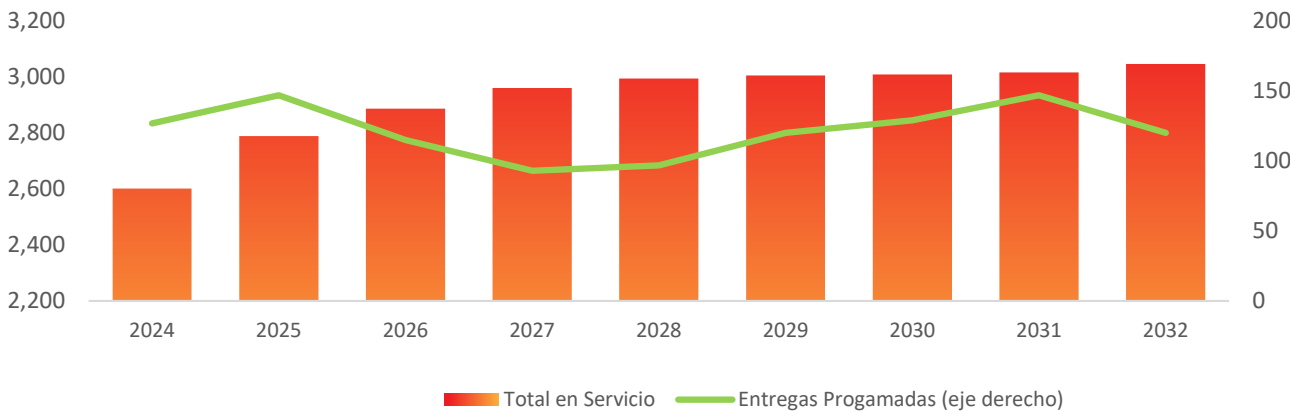


Fuente: CIRIUM

Anexo 4: Renovación de Flota y Densificación de Cabina en la Región

Desde 2005, las aerolíneas miembros de ALTA han incorporado casi 1.300 aviones a su flota (gráfica 29). En los últimos años, la mayoría de las nuevas incorporaciones corresponden a las variantes más modernas y eficientes que ofrecen los fabricantes, como el Boeing 737 MAX y la familia Airbus A320neo, que comenzaron a integrarse a partir de 2016. En los próximos años, las aerolíneas de ALTA planean poner en servicio más de 1.000 nuevas aeronaves, garantizando así una flota aún más moderna y eficiente (gráfica 30).

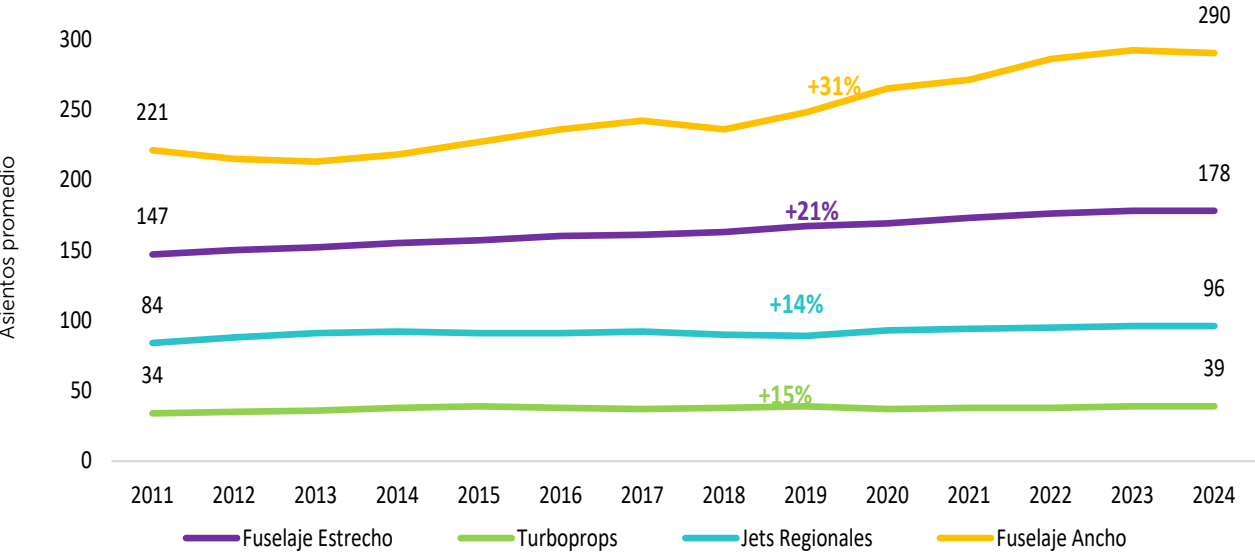
Gráfica 30.
Entregas Programadas en LAC



Fuente: CIRIUM

De igual manera, se han implementado medidas de densificación de cabina en todos los tipos de aeronaves de las aerolíneas de ALC lo que ha permitido aumentar la eficiencia por pasajero (gráfica 31).

Gráfica 31.
Densificación de Cabinas
(Asientos promedio por tipo de avión)



Fuente: Análisis de ALTA basado en CIRIUM



Referencias

1. **Air Transport Action Group. (2021).** Aviation Benefits Beyond Borders. Air Transport Action Group, Geneva, Switzerland. Disponible en <https://aviationbenefits.org/>.
2. **CBS News. (2022).** Extreme heat in the UK disrupts air travel, melts airport runway. Recuperado de: <https://www.cbsnews.com/news/extreme-heat-in-uk-disrupts-air-travel-melts-airport-runway/>
3. **Infobae. (2024).** ¿Cómo afecta el calor a los aviones? Aeroméxico restringe peso en sus vuelos por altas temperaturas en CDMX. Recuperado de: <https://www.infobae.com/mexico/2024/04/18/como-afecta-el-calor-a-los-aviones-aeromexico-restringe-peso-en-sus-vuelos-por-altas-temperaturas-en-cdmx/>
4. **Swissinfo.ch. (2024).** El aeropuerto de Porto Alegre puede seguir cerrado hasta fin de mes por las inundaciones. Disponible en <https://www.swissinfo.ch/spa/el-aeropuerto-de-porto-alegre-puede-seguir-cerrado-hasta-fin-de-mes-por-las-inundaciones/77046520>.
5. **Prosser, M. C., Williams, P. D., Marlton, G. J., & Harrison, R. G. (2023).** Evidence for large increases in clear-air turbulence over the past four decades. Geophysical Research Letters.
6. **Grupo Regional de Seguridad de la Aviación para Panamérica (RASG-PA). Informe Anual de Seguridad Operacional 2023.** Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), 2023. Disponible en: <https://www.icao.int/RASGPA/RASGPADocuments/ASR2023-13-SE.pdf>
7. **EUROCONTROL. (2021).** Climate Change Risks for European Aviation: Summary Report. Retrieved from <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2021-09/euro-control-study-climate-change-risk-european-aviation-summary-report-2021.pdf>
8. **OECD (2024),** Air and climate: Air Transport CO2 Emissions (Edition 2023), OECD Environment Statistics (database), <https://doi.org/10.1787/74a7d106-en> (consultado el 12 de septiembre de 2024).
9. **Air Transport Action Group (ATAG). (2020).** Waypoint 2050: Balancing growth in connectivity with a comprehensive global air transport sustainability strategy. Air Transport Action Group. Obtenido de <https://atag.org/resources/waypoint-2050-2nd-edition-september-2021/>
10. **ICAO. (2022).** Report on the feasibility of a long-term aspirational goal for international civil aviation CO2 emissions reductions. International Civil Aviation Organization. Obtenido de <https://www.icao.int/environmental-protection/LTAG/Pages/LTAGreport.aspx>
11. Griliches, Z. "Hybrid Corn: An Exploration in the Economics of Technological Change." *Econometrica*, 1957, 25(4), 501-522.
12. Rogers, E. M. Diffusion of Innovations (5th ed.). New York: Free Press, 2003
13. Wang, B., O'Sullivan, A., Dray, L., Al Zayat, K., & Schäfer, A. (2017). Modelling the pass-through of airline operating costs on average fares in the global aviation market. Air Transportation Systems Laboratory, UCL Energy Institute, University College London, London, UK.
14. **Aviacion News. (2023).** SAF: La mina de oro que Latinoamérica parece estar dispuesta a desperdiciar. Recuperado de <https://aviacionnews.com>
15. **Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias. (s.f.). Jatrofa:** Una alternativa para generar biocombustibles. Gobierno de México. Recuperado de <https://www.gob.mx>
16. **El Colombiano. (2024.).** Colombia busca ser pionera en los vuelos de cero emisiones con el uso de SAF, ¿cómo lo hará con caña y palma?. Recuperado de <https://www.elcolombiano.com>
17. **Banco Mundial. (s.f.).** Hidrógeno verde, clave para la transición energética en Chile. Recuperado de <https://www.bancomundial.org>



Contacto

José Ricardo Botelho
CEO ALTA


Juan Sarmiento
Head of Economics and User Charges
Jsarmiento@alta.aero


Milena Fajardo
Head of Fuel and Sustainability
mfajardo@alta.aero



 ALTA Latin American and Caribbean
Air Transport Association

 ALTA_aero

 aeroalta

 www.alta.aero