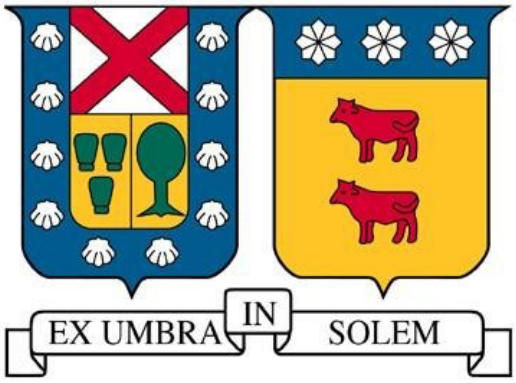
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE AERONÁUTICA
SANTIAGO – CHILE



EVALUACIÓN DEL ROL ESTRATÉGICO DE LOS COMBUSTIBLES SOSTENIBLES DE AVIACIÓN (SAF) EN CHILE.

JESSICA VALENTINA MEDINA BRITO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA EN AVIACIÓN COMERCIAL

PROFESOR GUÍA : SR. CRISTIAN CARVALLO G.
PROFESOR CORREFERENTE: SR. MARTINUS POTTERS.

OCTUBRE, 2026

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: EVALUACIÓN DEL ROL ESTRATÉGICO DE LOS COMBUSTIBLES SOSTENIBLES DE AVIACIÓN (SAF) EN CHILE

Nombre del candidato(a): JESSICA VALENTINA MEDINA BRITO

Carrera / Grado: INGENIERÍA EN AVIACIÓN COMERCIAL

Campus: Santiago Vitacura **;** **Departamento**: AERONAÚTICO

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, **Cristian Carvallo**, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 28/10/26; **Firma:** Firma digital. C. Carvallo. 28-10-2026

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 21/10/26 ; **Firma:** _____

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Dedicatoria

A Dios, por permitirme terminar aquello que, por su gracia, Él mismo puso en mis manos.

A mi mamá, Jessica, y a mi tía Ely, por ser pilares fundamentales en mi vida, por su amor incondicional, por cada sacrificio y por entregarme las herramientas necesarias para llegar hasta aquí. Gracias por confiar en mí. Este sueño no es solo mío, también es de ustedes.

Resumen

La presente memoria evaluó el rol estratégico de los Combustibles Sostenibles de Aviación (SAF) en Chile, integrando dimensiones técnicas, ambientales, económicas, sociales, regulatorias y de adopción tecnológica. La investigación se desarrolló mediante una metodología de análisis documental basada en literatura académica, normativa, estudios sectoriales, informes técnicos y documentos oficiales nacionales e internacionales. El estudio abordó el posicionamiento del SAF dentro del sistema aeronáutico y energético chileno, sus implicancias mediante el enfoque Triple Bottom Line, la función de los instrumentos regulatorios y económicos y las condiciones que inciden en su adopción.

Los resultados muestran que Chile ha avanzado desde la planificación estratégica hacia la evaluación de alternativas más concretas de implementación, aunque aún no cuenta con producción comercial consolidada ni con un suministro continuo de SAF a escala nacional. Se identificaron alternativas asociadas a aceites de cocina usados, residuos agrícolas y forestales, residuos sólidos municipales y combustibles sintéticos vinculados al hidrógeno renovable. Sin embargo, la disponibilidad teórica de estos recursos no equivale a una capacidad efectiva de producción, debido a restricciones relacionadas con recuperación, logística, competencia con otros usos, infraestructura y requerimientos tecnológicos.

En el caso de los aceites de cocina usados, el escenario optimista revisado supone recolectar el 75% del potencial proyectado para 2035 y utilizar una configuración HEFA orientada a maximizar SAF, con lo que podría cubrirse aproximadamente un 4,1% de la demanda nacional de combustible de aviación considerada para ese año. Esto permite considerarlo como una alternativa inicial, pero insuficiente por sí sola para sostener una incorporación de SAF a gran escala, por lo que sería necesario complementar distintas materias primas y tecnologías.

La evaluación mediante Triple Bottom Line mostró que el desempeño ambiental del SAF depende del ciclo de vida completo del combustible y no únicamente del origen renovable o residual de la materia prima. En la dimensión económica, las principales restricciones corresponden a la diferencia de costo respecto del combustible convencional, las necesidades de inversión, y la incertidumbre asociada al desarrollo del mercado. Como referencia, los precios internacionales del SAF reportados para 2024, se situaron en torno a tres veces el precio promedio del combustible convencional. En la dimensión social se identificaron

oportunidades de formación de capital humano y generación de nuevas actividades productivas; sin embargo, la evidencia disponible no permite cuantificar con suficiente respaldo el número de empleos que podría generar una futura industria nacional. El análisis de los instrumentos regulatorios y económicos determinó que ningún mecanismo individual permite resolver todas las barreras identificadas. Las medidas orientadas a generar demanda pueden proporcionar mayor certidumbre de mercado, mientras que los instrumentos financieros, tributarios y de apoyo a la inversión pueden actuar sobre los costos y las necesidades de capital. Su implementación requiere una combinación progresiva y coherente con la capacidad efectiva de suministro, la infraestructura disponible y el desempeño ambiental de las distintas alternativas.

Desde la perspectiva de la Teoría de Difusión de Innovaciones, la compatibilidad del SAF con el sistema aeronáutico existente constituye una condición favorable para su adopción. Sin embargo, los costos, la disponibilidad limitada y la ausencia de un suministro comercial continuo siguen siendo barreras relevantes. En Chile, antecedentes como el vuelo de traslado de JetSMART con una mezcla de SAF en 2023, las pruebas técnicas de ENAP y el desarrollo del Business Implementation Study (BIS), orientado a evaluar posibles proyectos de producción, muestran avances en utilización puntual, experimentación y evaluación de alternativas, pero no permiten afirmar que exista una adopción comercial consolidada ni clasificar al país dentro de una categoría específica de adoptantes de Rogers.

La investigación concluye que el rol estratégico más directo y actualmente mejor sustentado del SAF en Chile corresponde a su contribución potencial a la descarbonización de la aviación. Sus posibles beneficios en seguridad energética, valorización de residuos y desarrollo socioeconómico dependen en mayor medida de que el país logre establecer producción nacional sostenible y económicamente viable. El desafío consiste en transformar el potencial identificado en alternativas capaces de alcanzar reducciones verificables de emisiones y generar valor nacional bajo condiciones de sostenibilidad técnica, ambiental y económica.

Palabras clave: Combustibles sostenibles de aviación; SAF; descarbonización; aviación; Chile; Triple Bottom Line; difusión de innovaciones.

Abstract

This study evaluated the strategic role of Sustainable Aviation Fuels (SAF) in Chile by integrating technical, environmental, economic, social, regulatory, and technological adoption dimensions. The research was conducted using a documentary analysis methodology based on academic literature, regulatory documents, sectoral studies, technical reports, and official national and international documents. The study examined the positioning of SAF within the Chilean aviation and energy system, its implications through the Triple Bottom Line approach, the role of regulatory and economic instruments, and the conditions influencing its adoption.

The results show that Chile has progressed from strategic planning toward the assessment of more concrete implementation alternatives, although the country still lacks consolidated commercial production and a continuous SAF supply at the national level. Alternatives associated with used cooking oil, agricultural and forest residues, municipal solid waste, and synthetic fuels linked to renewable hydrogen were identified. However, the theoretical availability of these resources does not necessarily translate into effective production capacity due to constraints related to recovery, logistics, competition with alternative uses, infrastructure, and technological requirements.

For used cooking oil, the optimistic scenario reviewed assumes the collection of 75% of the projected generation potential by 2035 and the use of a HEFA configuration designed to maximize SAF production, potentially covering approximately 4.1% of the national aviation fuel demand considered for that year. This suggests that it could serve as an initial alternative, although it would be insufficient on its own to support large-scale SAF deployment. Therefore, different feedstocks and technological pathways would need to be combined.

The Triple Bottom Line assessment showed that the environmental performance of SAF depends on the fuel's entire life cycle and not solely on the renewable or residual origin of the feedstock. From an economic perspective, the main constraints are the higher price of SAF compared with conventional aviation fuel, investment requirements, and uncertainty associated with market development. As a reference, international SAF prices reported for 2024 were approximately three times the average price of conventional aviation fuel. From a social perspective, opportunities were identified for human capital development and the creation of new productive activities; however, the available evidence does not provide

sufficient support to quantify the number of jobs that a future domestic industry could generate. The analysis of regulatory and economic instruments determined that no single mechanism can address all the identified barriers. Measures aimed at generating demand can provide greater market certainty, while financial, tax, and investment support instruments can address costs and capital requirements. Their implementation requires a progressive and coherent combination aligned with effective supply capacity, available infrastructure, and the environmental performance of the different alternatives.

From the perspective of the Diffusion of Innovations theory, the compatibility of SAF with the existing aviation system represents a favorable condition for its adoption. However, costs, limited availability, and the absence of a continuous commercial supply remain relevant barriers. In Chile, developments such as JetSMART's 2023 ferry flight using a SAF blend, ENAP's technical trials, and the development of the Business Implementation Study (BIS), aimed at evaluating potential SAF production projects, reflect progress in one-off SAF use, experimentation, and the evaluation of alternatives, but they do not support the conclusion that consolidated commercial adoption has been achieved, nor do they allow Chile to be classified within a specific category of adopters under Rogers's framework.

The study concludes that the most direct and currently best-supported strategic role of SAF in Chile lies in its potential contribution to aviation decarbonization. Its potential benefits in terms of energy security, waste valorization, and socioeconomic development depend to a greater extent on the country's ability to establish sustainable and economically viable domestic production. The challenge is to transform the identified potential into alternatives capable of achieving verifiable emission reductions and generating national value under conditions of technical, environmental, and economic sustainability.

Keywords: Sustainable Aviation Fuels; SAF; decarbonization; aviation; Chile; Triple Bottom Line; diffusion of innovations.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN **9**

1. Antecedentes generales **11**

1.1 Justificación del tema *11*

1.2 Objetivos *14*

1.3 Metodología *15*

1.4 Alcance *17*

2. Estado del arte **18**

2.1 Antecedentes……. **18**

2.1.1 Contexto de la descarbonización en la aviación *18*

2.1.2 Emisiones del sector aéreo global y nacional *20*

2.1.3 Objetivos internacionales *22*

2.1.4 Estrategias nacionales en Chile *25*

2.1.5 Experiencias internacionales en el desarrollo del SAF 30

2.2 Marco teórico..……34

2.2.1 Triple Bottom Line *34*

2.2.2 Economía circular *35*

2.2.3 Evaluación de ciclo de vida *36*

2.2.4 Rutas tecnológicas SAF *37*

2.2.5 Criterios CORSIA y normas ASTM *42*

2.2.6 Teoría de difusión de innovaciones de Rogers *45*

2.3 Propuesta metodológica **49**

3. Desarrollo……51

3.1Análisis del posicionamiento del SAF en Chile *51*

3.2Evaluación ambiental, económica y social del SAF en Chile *61*

3.3Análisis de instrumentos regulatorios y económicos para el desarrollo del SAF en Chile……. 72

3.4Análisis del proceso de adopción del SAF en Chile *78*

4. Conclusiones **83**

5. Bibliografía **86**

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Procesos de conversión de SAF aprobados ..... ……38
Figura 2.2. Proceso de producción mediante la ruta HEFA 41
Figura 3.1. Ecosistema nacional de los SAF……60
Figura 3.2. Comparación de precios internacionales del combustible convencional y SAF en 2024……65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Síntesis de los principales objetivos y mecanismos internacionales de descarbonización de la aviación……25
Tabla 3.1. Proyección de demanda nacional de combustible de aviación……51
Tabla 3.2. Escenario proyectado de producción nacional de SAF.....52
Tabla 3.3. Producción de SAF proyectada por tecnología para 2050.....57
Tabla 3.4. Escenario de despliegue de plantas de SAF en Chile 59

Introducción

La aviación comercial cumple un papel importante en la conectividad de los territorios, el transporte de pasajeros y carga, el turismo y la integración económica. Sin embargo, su elevada dependencia de combustibles líquidos de origen fósil plantea un desafío para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. A diferencia de otros segmentos del transporte, la electrificación directa y otras alternativas de propulsión presentan mayores restricciones para operaciones de medio y largo alcance, debido principalmente a los requerimientos de autonomía, masa, almacenamiento energético e infraestructura. Es por esto que la descarbonización del transporte aéreo requiere combinar distintas soluciones tecnológicas, operacionales y energéticas.

Dentro de estas alternativas, los Combustibles Sostenibles de Aviación (Sustainable Aviation Fuels, SAF) han adquirido cada vez más importancia debido a que determinadas rutas permiten su incorporación al sistema aeronáutico existente bajo las condiciones técnicas, de certificación y de mezcla correspondientes. Los SAF pueden producirse mediante distintas tecnologías y a partir de diversas materias primas, entre ellas residuos, biomasa y recursos asociados a la producción de combustibles sintéticos. No obstante, su contribución ambiental no depende únicamente de sustituir el combustible fósil, sino también de la materia prima utilizada, el proceso de conversión, las fuentes de energía y las emisiones generadas durante su ciclo de vida.

Para Chile, el análisis de estas alternativas adquiere relevancia debido al crecimiento proyectado de la demanda de combustible de aviación y al desarrollo reciente de iniciativas orientadas a evaluar la incorporación de SAF. El Estudio de Factibilidad sobre el Uso de Combustibles Sostenibles de Aviación en Chile proyecta que el consumo nacional de combustible de aviación podría aumentar aproximadamente un 129% entre 2019 y 2050, incluso considerando mejoras de eficiencia (Lecocq, 2025). Por otro lado, la Hoja de Ruta SAF 2050 estableció una meta aspiracional de alcanzar una participación de 50% de SAF en el combustible utilizado para la aviación de Chile hacia 2050 y definió líneas de acción vinculadas con capacidades, regulación, mercado, tecnología y coordinación entre actores (Ministerio de Energía et al., 2024).

El proceso nacional ha avanzado desde la definición de lineamientos estratégicos hacia la evaluación de condiciones más específicas de implementación. A la Hoja de Ruta y al Estudio de Factibilidad se suma el desarrollo, durante 2026, de un Business Implementation Study orientado a profundizar alternativas concretas de producción y sus requerimientos técnicos, económicos, logísticos y de infraestructura (Junta de Aeronáutica Civil, 2026). Sin embargo, la existencia de recursos, tecnologías, estudios e iniciativas no permite determinar por sí sola cuál puede ser el rol estratégico del SAF en Chile. Su contribución potencial depende de la interacción entre condiciones ambientales, económicas, sociales, tecnológicas, regulatorias y de mercado, así como del grado de desarrollo de una eventual cadena de suministro nacional.

La presente memoria tiene como objetivo evaluar el rol estratégico de los SAF en Chile como herramienta frente a los desafíos nacionales de descarbonización, seguridad energética, gestión y valorización de residuos y desarrollo socioeconómico. Para ello, se adopta una metodología de análisis documental basada en fuentes oficiales, normativa, literatura académica, estudios sectoriales e informes técnicos nacionales e internacionales. El análisis se desarrolla en cuatro ámbitos: el posicionamiento del SAF dentro del sistema aeronáutico y energético chileno; sus implicancias ambientales, económicas y sociales mediante el enfoque Triple Bottom Line; la influencia de los instrumentos regulatorios y económicos en su viabilidad; y las condiciones de adopción interpretadas mediante la Teoría de Difusión de Innovaciones de Rogers.

El alcance de la investigación es exploratorio, descriptivo y analítico, y se concentra en la aviación civil y en las condiciones que pueden favorecer o restringir el desarrollo del SAF en Chile. Se consideran las principales rutas tecnológicas, materias primas, capacidades, actores e instrumentos relacionados con su eventual despliegue, sin abordar diseño ingenieril de plantas, la modelación propia de procesos industriales ni la evaluación financiera detallada de proyectos específicos. De esta manera, la investigación busca integrar críticamente los antecedentes técnicos, ambientales, económicos, sociales y regulatorios disponibles sobre el desarrollo del SAF en Chile, complementándolos mediante la aplicación de los enfoques Triple Bottom Line y de Difusión de Innovaciones de Rogers. A partir de esta evaluación se busca distinguir los beneficios potenciales del SAF de las condiciones necesarias para su materialización en el contexto nacional.

1. Antecedentes generales

1.1 Justificación del tema

El transporte aéreo cumple un papel fundamental en la conectividad global, facilitando el comercio internacional, el turismo y la integración económica entre países. Sin embargo, el crecimiento sostenido de la aviación comercial durante las últimas décadas ha incrementado la preocupación respecto de su impacto ambiental, particularmente por las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al uso de combustibles fósiles.

La aviación representa aproximadamente el 2,5% de las emisiones mundiales de dióxido de carbono de origen humano (IATA, 2026). Si bien su participación relativa depende de la evolución de las emisiones de otros sectores y de las medidas de mitigación implementadas, el crecimiento de la demanda de transporte aéreo constituye un desafío para la reducción de sus emisiones. A diferencia de otros segmentos del transporte, la aviación enfrenta mayores restricciones para la electrificación directa, especialmente en aeronaves destinadas a vuelos de medio y largo alcance. Esta condición hace necesario considerar alternativas que permitan reducir las emisiones del sector sin depender exclusivamente de la sustitución de los sistemas de propulsión actuales.

En este contexto, los Combustibles Sostenibles de Aviación (Sustainable Aviation Fuels, SAF) han adquirido especial relevancia como una de las principales alternativas disponibles para reducir las emisiones asociadas al uso de combustibles fósiles en la aviación. Los SAF pueden producirse mediante distintas rutas y a partir de diversas materias primas, y determinadas alternativas pueden incorporarse al sistema aeronáutico existente bajo las condiciones técnicas, de certificación y de mezcla establecidas para cada combustible (OACI, s. f.-a). Esta característica permite considerarlos como una alternativa relevante para avanzar en la descarbonización del sector mientras se desarrollan otras soluciones tecnológicas. La OACI identifica al SAF como la alternativa con mayor potencial para reducir las emisiones de CO_2 de la aviación internacional dentro de los escenarios analizados por la organización (OACI, s. f.-b).

La relevancia del SAF trasciende su función como combustible alternativo, debido a que su desarrollo puede involucrar nuevas actividades productivas y cadenas de valor asociadas a la

transición energética. Estas pueden comprender la disponibilidad y valorización de materias primas, los procesos de transformación, el desarrollo de infraestructura, la producción y distribución de combustibles, así como nuevas necesidades de inversión, tecnología y capacidades especializadas.

En el caso de Chile, la relevancia de esta transición toma especial importancia considerando que actualmente el combustible utilizado por la aviación es de origen fósil y que la demanda del sector presenta una tendencia creciente. De acuerdo con el Estudio de Factibilidad sobre el Uso de Combustibles Sostenibles de Aviación en Chile, se proyecta que el consumo de combustibles de aviación en el país podría aumentar en un 129% entre 2019 y 2050, incluso considerando medidas de eficiencia energética (Lecocq, 2025). Esta proyección evidencia la necesidad de considerar alternativas que permitan abordar el crecimiento futuro de la demanda energética del sector sin mantener una dependencia exclusiva de combustibles fósiles.

Durante los últimos años, Chile ha comenzado a desarrollar una estructura de iniciativas orientadas al avance del SAF, entre las que se encuentran el programa Vuelo Limpio, la Hoja de Ruta SAF 2050 y el Estudio de Factibilidad sobre el Uso de Combustibles Sostenibles de Aviación desarrollado bajo el programa ACT-SAF de la OACI. La Hoja de Ruta SAF 2050, presentada en 2024, estableció como objetivo que el SAF alcance una participación del 50% del consumo de combustible de aviación en Chile hacia 2050 y definió líneas de acción relacionadas con estudios, regulación y mercado, acuerdos, producción y desarrollo de un proyecto piloto (Ministerio de Energía et al., 2024). Posteriormente, el Estudio de Factibilidad desarrollado bajo ACT-SAF permitió profundizar en las condiciones técnicas, productivas, energéticas y de infraestructura asociadas al desarrollo de SAF en el país (Lecocq, 2025).

Estos avances muestran que el desarrollo del SAF en Chile ha evolucionado desde la definición de lineamientos y acciones iniciales hacia estudios destinados a identificar las condiciones necesarias para su implementación. A su vez, durante 2026 se ha avanzado hacia un Business Implementation Study orientado a profundizar alternativas concretas de producción de SAF en el país, incluyendo el coprocesamiento de aceites de cocina usados, rutas Alcohol-to-Jet y alternativas Power-to-Liquid y Methanol-to-Jet (JAC, 2026). Esta

evolución evidencia que el SAF ha comenzado a adquirir una mayor presencia dentro de la planificación aeronáutica y energética nacional.

La existencia de iniciativas, estudios y alternativas tecnológicas no permite, por sí sola, establecer qué función puede desempeñar el SAF frente a los distintos desafíos nacionales, debido a que sus beneficios y restricciones dependen de condiciones técnicas, ambientales, económicas, sociales, regulatorias y de adopción. Por ello, resulta necesario abordar el SAF desde una perspectiva integrada que permita analizar tanto las condiciones existentes como las oportunidades y restricciones asociadas a su incorporación en el sistema aeronáutico y energético nacional.

En este contexto, evaluar el rol estratégico del SAF en Chile resulta relevante para determinar en qué ámbitos puede contribuir a la descarbonización de la aviación, la seguridad energética, la gestión y valorización de residuos y el desarrollo socioeconómico, así como las condiciones que pueden favorecer o limitar dichas contribuciones. Sobre esta base, la presente memoria aborda el SAF desde una perspectiva técnica, ambiental, económica, social, regulatoria y de adopción tecnológica.

1.2 Objetivos

Objetivo general

Evaluar el rol estratégico de los Combustibles Sostenibles de Aviación (SAF) en Chile como herramienta para enfrentar los desafíos nacionales de descarbonización, seguridad energética, gestión de residuos y desarrollo socioeconómico, integrando enfoques técnicos, ambientales, económicos, sociales y de política pública.

Objetivos específicos

1. Analizar el posicionamiento del SAF dentro del sistema aeronáutico y energético chileno, considerando restricciones tecnológicas y lineamientos estratégicos nacionales.
2. Evaluar los impactos ambientales, económicos y sociales del despliegue del SAF en Chile, integrando el enfoque Triple Bottom Line y evidencia disponible de evaluaciones de ciclo de vida, brechas de costo y potencial de generación de empleo.
3. Analizar la influencia de los instrumentos regulatorios y económicos en la viabilidad del SAF en Chile, considerando políticas climáticas, incentivos públicos y marcos regulatorios relevantes.
4. Evaluar el proceso de adopción del SAF en Chile mediante la Teoría de Difusión de Innovaciones de Rogers, interpretando la evidencia disponible sobre su incorporación por parte de los principales actores del sistema aeronáutico y energético nacional.

1.3 Metodología

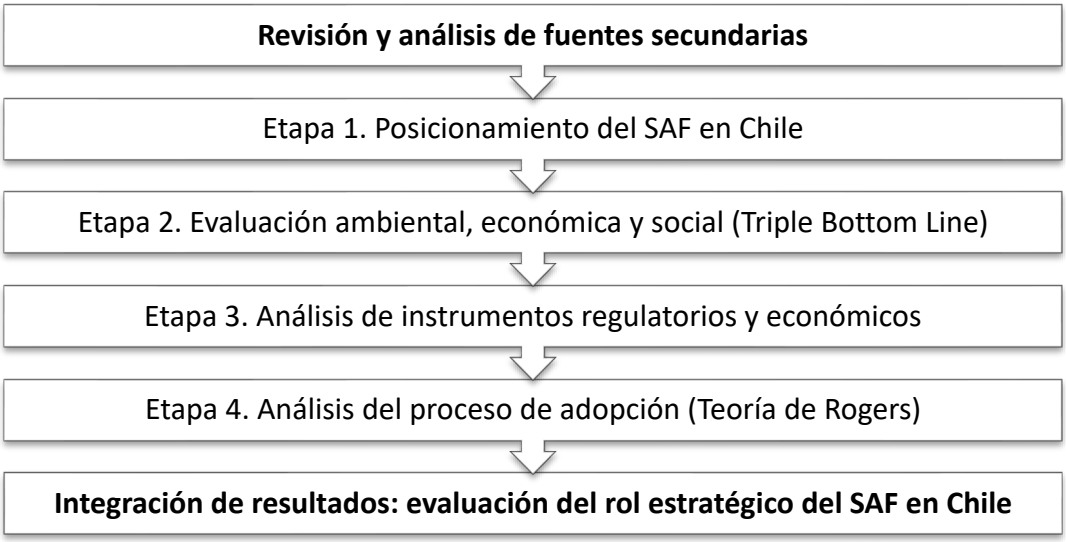
La presente memoria se desarrolla mediante una metodología de análisis documental basada en fuentes secundarias, con el propósito de evaluar el rol estratégico de los Combustibles Sostenibles de Aviación (SAF) en Chile. El procedimiento comprendió la revisión de antecedentes nacionales e internacionales, el contraste de información y su análisis mediante los enfoques teóricos seleccionados.

Se utilizaron documentos oficiales, literatura académica, estudios técnicos e informes sectoriales. Entre las principales fuentes se encuentran la Hoja de Ruta SAF 2050, el Estudio de Factibilidad sobre el Uso de Combustibles Sostenibles de Aviación en Chile, desarrollado en el marco del programa ACT-SAF de la OACI, el estudio nacional sobre aceites de cocina usados 2026 y las investigaciones económicas y tecnológicas citadas en el desarrollo.

Los antecedentes se organizaron de acuerdo con los cuatro objetivos específicos de la investigación. En primer lugar, se analiza el posicionamiento del SAF en el sistema aeronáutico y energético chileno, considerando la demanda de combustible de aviación, la disponibilidad potencial de materias primas, las rutas tecnológicas y la infraestructura asociada a su producción y suministro.

Posteriormente, las implicancias ambientales, económicas y sociales se analizaron mediante el enfoque Triple Bottom Line. Los instrumentos regulatorios y económicos se examinaron en relación con las barreras identificadas para el desarrollo del SAF. Por su parte, la Teoría de Difusión de Innovaciones de Rogers se utiliza para interpretar las condiciones de adopción a partir de sus cinco atributos, distinguiendo las experiencias de prueba de la incorporación comercial efectiva.

Finalmente, los resultados se integraron para evaluar las contribuciones potenciales del SAF a la descarbonización de la aviación, la seguridad energética, la valorización de recursos y el desarrollo socioeconómico, considerando las oportunidades identificadas y las condiciones que podrían limitar su materialización.



Fuente: Elaboración propia.

1.4 Alcance

El alcance es exploratorio, descriptivo y analítico. Es exploratorio porque el desarrollo del SAF en Chile aún se encuentra en una etapa de formación, sin una industria nacional consolidada que permita evaluarlo desde resultados operacionales de gran escala. Es descriptivo porque caracteriza el contexto aeronáutico, energético, regulatorio e institucional en el que podría desarrollarse el SAF en el país. A su vez, es analítico porque busca interpretar las condiciones, oportunidades y limitaciones asociadas a su desarrollo y evaluar su posible rol estratégico frente a desafíos nacionales de descarbonización, seguridad energética, valorización de residuos y el desarrollo socioeconómico.

En términos temáticos, se centra en el SAF destinado a la aviación civil y aborda sus dimensiones técnicas, ambientales, económicas, sociales y regulatorias. Se consideran las principales rutas tecnológicas, materias primas, capacidades nacionales, actores e instrumentos relacionados con su desarrollo, sin profundizar en el diseño ingenieril de procesos o plantas específicas ni desarrollar una evaluación financiera de proyectos particulares.

En términos temporales, la investigación considera principalmente antecedentes disponibles hasta 2026, incorporando información anterior cuando resulta necesaria para comprender la evolución del SAF y de las políticas relacionadas con su desarrollo. El año 2050 se utiliza como horizonte de referencia para las metas, proyecciones y estrategias de largo plazo que están relacionadas con la descarbonización y el SAF. En términos geográficos, el análisis se centra en Chile y utiliza experiencias internacionales cuando permiten contextualizar, comparar o extraer elementos relevantes para el análisis nacional.

La memoria no contempla trabajo experimental, levantamiento primario de datos, modelación propia de procesos industriales ni diseño o evaluación financiera detallada de una planta de producción de SAF, ya que el foco está puesto en el análisis estratégico del SAF en Chile a partir de información secundaria y de la integración de dimensiones técnica, ambiental, económica, social, regulatoria y de adopción tecnológica.

2. Estado del arte

2.1 Antecedentes

Se presentan los principales antecedentes que permiten contextualizar el desarrollo de los Combustibles Sostenibles de Aviación (SAF). Se aborda la descarbonización de la aviación, las emisiones del sector, los compromisos internacionales, las estrategias de Chile y las experiencias internacionales relacionadas con el SAF. Estos antecedentes permiten establecer el contexto en el que posteriormente se evalúa el rol estratégico del SAF en Chile.

2.1.1 Contexto de la descarbonización en la aviación

La descarbonización de la aviación constituye uno de los desafíos relevantes de la transición energética, debido a las características particulares de la operación aérea y a su elevada dependencia de combustibles líquidos con alta densidad energética. Esta condición resulta especialmente relevante en aeronaves destinadas a operaciones de medio y largo alcance, donde los requerimientos de autonomía, masa y energía dificultan la sustitución directa del combustible convencional mediante tecnologías actualmente disponibles. Por esta razón, la reducción de las emisiones del transporte aéreo requiere considerar un conjunto de medidas tecnológicas, operacionales y energéticas, en lugar de depender de una única alternativa de sustitución.

Dentro de las alternativas de largo plazo se encuentra la electrificación de las aeronaves y el desarrollo de sistemas propulsados mediante hidrógeno. Sin embargo, ambas opciones presentan desafíos asociados a su incorporación a la aviación comercial de mayor alcance. La electrificación enfrenta limitaciones relacionadas principalmente con la densidad energética de las baterías y la masa requerida para almacenar la energía necesaria, lo que afecta la autonomía y la capacidad de carga de la aeronave, mientras que el hidrógeno requiere resolver aspectos relacionados con su almacenamiento, distribución, infraestructura aeroportuaria, adaptación de las aeronaves y desarrollo tecnológico. Estas restricciones no eliminan el potencial de dichas alternativas, pero condicionan el ritmo y los segmentos de la aviación en los que podrían implementarse a gran escala.

En este contexto, los Combustibles Sostenibles de Aviación (SAF) han adquirido especial relevancia dentro de las estrategias de descarbonización de la aviación. Su principal

característica, desde el punto de vista de la transición tecnológica, es que determinados SAF pueden utilizarse como combustibles de sustitución directa (*drop-in fuels)* bajo las condiciones de certificación y mezcla correspondientes, permitiendo reducir la dependencia del combustible fósil sin requerir, en principio, una renovación completa de la flota ni una transformación radical de la infraestructura existente (Lecocq, 2025). La OACI identifica al SAF como la alternativa con mayor potencial de reducción de CO_2 de la aviación internacional dentro del análisis LTAG (OACI, s. f.-b).

La importancia del SAF se encuentra además vinculada con el horizonte de descarbonización establecido para la aviación internacional. La OACI adoptó en 2022 un objetivo global aspiracional de emisiones netas de carbono cero para la aviación internacional al año 2050, acompañado por una estrategia que considera distintas medidas de mitigación, entre ellas mejoras tecnológicas, operacionales, medidas basadas en el mercado y el desarrollo de combustibles sostenibles y otras energías más limpias (OACI, 2022). En este marco, el SAF constituye una alternativa relevante para avanzar en la reducción de emisiones mientras continúan desarrollándose tecnologías de propulsión y combustibles de menor impacto que podrían tener una aplicación más amplia en el largo plazo.

No obstante, la incorporación del SAF no debe interpretarse como una solución exenta de restricciones. Su desarrollo depende de la disponibilidad sostenible de materias primas, la madurez y escalabilidad de las distintas rutas tecnológicas, los costos de producción, la infraestructura necesaria, los criterios de sostenibilidad y la existencia de condiciones regulatorias y económicas que permitan su incorporación al mercado (Lecocq, 2025). En consecuencia, la relevancia del SAF para la descarbonización de la aviación no depende únicamente de sus características como combustible, sino también de las condiciones que permitan producirlo, distribuirlo y utilizarlo de manera sostenible y económicamente viable.

Desde esta perspectiva, la descarbonización de la aviación constituye un problema que trasciende la sustitución del combustible fósil. Su abordaje requiere considerar simultáneamente las condiciones tecnológicas, ambientales, económicas, regulatorias y de mercado que determinan la viabilidad de las distintas alternativas. Este contexto permite situar al SAF como una de las alternativas relevantes de la transición energética del sector y

proporciona la base para analizar posteriormente la magnitud de las emisiones de la aviación, los compromisos internacionales y, específicamente, las condiciones que Chile ha comenzado a desarrollar para su incorporación.

2.1.2 Emisiones del sector aéreo global y nacional

La relevancia climática de la aviación puede comprenderse a partir de la magnitud de sus emisiones y de la recuperación y crecimiento de la demanda de transporte aéreo. De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (IEA), en 2023 la aviación generó aproximadamente 950 millones de toneladas de CO_2, equivalentes a cerca del 2,5% de las emisiones mundiales de CO_2 relacionadas con la energía. Este nivel representó más del 90% de los valores registrados antes de la pandemia, reflejando la recuperación de la actividad aérea posterior a la disminución observada durante los años de restricciones sanitarias (IEA, 2025).

Sin embargo, la contribución de la aviación al cambio climático no se limita a las emisiones de CO_2 producidas durante la combustión del combustible. Las operaciones aéreas también generan efectos climáticos asociados a emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx), vapor de agua, material particulado y a la formación de estelas de condensación y cirros inducidos. La OACI estima que, considerando los efectos climáticos de la aviación distintos del CO_2, junto con el CO_2, la contribución histórica del sector al forzamiento radiativo antropogénico es superior a la que se obtiene al considerar únicamente sus emisiones directas de CO_2. En particular, Lee et al. (2021) estimaron que la aviación contribuyó aproximadamente un 3,5% al forzamiento radiativo efectivo antropogénico total, aunque existe incertidumbre respecto de la magnitud de algunos efectos no relacionados con el CO_2.

Esta distinción resulta relevante para el análisis de la descarbonización del transporte aéreo, debido a que una reducción de las emisiones de CO_2 no implica necesariamente la eliminación de todos los impactos climáticos asociados a la operación de las aeronaves. No obstante, el CO_2 continúa constituyendo un componente central de las estrategias de mitigación del sector, debido a su acumulación en la atmósfera y a la necesidad de reducir progresivamente el uso de combustibles fósiles.

En el caso chileno, la magnitud de las emisiones debe analizarse considerando el tamaño relativo de la aviación nacional y su importancia dentro del sistema de transporte.

El Estudio de Factibilidad sobre el Uso de Combustibles Sostenibles de Aviación en Chile,

desarrollado por la OACI, señala que para 2019 las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la aviación dentro del territorio nacional alcanzaron aproximadamente 2.060 $ktCO_2e$. Esta cantidad representó un 7,3% de las emisiones totales del sector transporte y aproximadamente un 1,9% de las emisiones nacionales de gases de efecto invernadero (Lecocq, 2025). Estas cifras permiten dimensionar la participación de la aviación dentro del inventario nacional sin interpretar su contribución como una proporción equivalente de las emisiones mundiales.

A nivel internacional, la participación relativa de Chile es considerablemente menor debido al tamaño de su mercado aéreo. En 2017, Chile contribuyó aproximadamente con un 0,3% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero provenientes del transporte aéreo (Ministerio de Energía et al., 2024). Este indicador debe interpretarse como una participación relativa dentro de las emisiones globales del transporte aéreo y no como la contribución de la aviación al total de emisiones nacionales. El antecedente permite, sin embargo, contextualizar la escala del sector chileno dentro de la actividad aérea mundial.

La magnitud actual de las emisiones debe además analizarse junto con la evolución esperada de la demanda. El Estudio de Factibilidad de la OACI proyecta que el consumo de combustible de aviación en Chile podría aumentar desde aproximadamente 1.583 millones de litros en 2019 hasta cerca de 3.674 millones de litros en 2050, lo que implica que el consumo proyectado sería más del doble del registrado en 2019. Esta proyección evidencia que el desafío climático del sector no consiste únicamente en reducir las emisiones existentes, sino también en evitar que el crecimiento futuro de la actividad aérea se traduzca en un aumento proporcional del consumo de combustibles fósiles (Lecocq, 2025).

En consecuencia, la dimensión de las emisiones de la aviación debe analizarse conjuntamente con la trayectoria esperada de la demanda. Aunque la participación de la aviación chilena en las emisiones globales es reducida, el crecimiento proyectado del consumo de combustible y la importancia del transporte aéreo para la actividad nacional hacen necesario considerar medidas que permitan desacoplar, progresivamente, el crecimiento de la actividad aérea del consumo de combustibles fósiles. Este contexto permite comprender la relevancia de las medidas de mitigación que serán abordadas en los apartados siguientes, particularmente aquellas relacionadas con combustibles sostenibles, mejoras tecnológicas y operacionales y

mecanismos regulatorios.

2.1.3 Objetivos internacionales

La descarbonización de la aviación se desarrolla dentro de un marco internacional de acción climática que establece objetivos generales para la reducción de emisiones y, posteriormente, mecanismos y estrategias específicos para el transporte aéreo. El Acuerdo de París, adoptado en 2015 en el Marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, constituye uno de los principales referentes de la política climática internacional. Su artículo 2 establece como objetivo mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2°C respecto de los niveles preindustriales y realizar esfuerzos para limitar dicho aumento a 1,5°C (UNFCCC, 2015). Si bien las emisiones de la aviación internacional son abordadas específicamente mediante un marco sectorial específico de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), el Acuerdo de París proporciona el contexto climático general en el que se desarrollan los compromisos de descarbonización del transporte aéreo.

Dentro de la gobernanza específica de la aviación internacional, uno de los principales hitos corresponde a que durante la 41ª Asamblea de la OACI, realizada en 2022, los Estados miembros adoptaron el Long-Term Global Aspirational Goal (LTAG), que establece como objetivo colectivo y aspiracional alcanzar cero emisiones netas de carbono para la aviación internacional al año 2050. La OACI señala que este objetivo fue adoptado en apoyo del objetivo de temperatura del Acuerdo de París y que su cumplimiento dependerá de la combinación de distintas medidas de reducción de emisiones, entre ellas se consideran el desarrollo y adopción de nuevas tecnologías de aeronaves, mejoras operacionales y el aumento de la producción y utilización de combustibles sostenibles de aviación (OACI, 2022). De esta manera, el LTAG establece un horizonte común para la transformación ambiental del sector, pero no determina una única tecnología ni atribuye a cada Estado una obligación individual de reducción equivalente. Su implementación debe considerar las distintas circunstancias, capacidades y condiciones de los países participantes.

Junto con este objetivo de largo plazo, la aviación internacional cuenta con mecanismos específicos destinados a abordar sus emisiones durante el proceso de transición. Entre ellos se encuentra el Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA), establecido por la OACI como un mecanismo mundial basado en el mercado para

abordar el crecimiento de las emisiones de CO_2 de la aviación internacional. Su implementación contempla una fase piloto entre 2021 y 2023, una primera fase entre 2024 y 2026 y una segunda fase entre 2027 y 2035. La participación de los Estados durante las dos primeras etapas es voluntaria, mientras que la participación de la segunda fase se determina conforme a criterios establecidos por la OACI, considerando la actividad de aviación internacional de los Estados y determinadas excepciones (OACI, 2024).

La relación entre CORSIA y los combustibles sostenibles resulta particularmente relevante debido a que el esquema reconoce el uso de combustibles elegibles como una de las vías mediante las cuales los operadores pueden reducir las emisiones consideradas dentro del sistema. Para ello, los combustibles deben cumplir los criterios de sostenibilidad, requisitos de elegibilidad y procedimientos de certificación y verificación establecidos bajo el marco correspondiente. De esta manera, la utilización de un combustible SAF no depende únicamente de que este pueda ser utilizado técnicamente en una aeronave, sino también de que pueda demostrar un desempeño ambiental compatible con los criterios internacionales aplicables. Esta consideración adquiere especial importancia debido a que la reducción de emisiones atribuible a un SAF debe analizarse durante su ciclo de vida y no únicamente durante la combustión del combustible en la aeronave.

Otro avance relevante se produjo en noviembre de 2023, durante la Tercera Conferencia de la OACI sobre Aviación y Combustibles Alternativos (CAAF/3), donde se adoptó el Global Framework for Sustainable Aviation Fuels (SAF), Lower Carbon Aviation Fuels (LCAF) and other Aviation Cleaner Energies, que incorpora una visión colectiva mundial aspiracional orientada a reducir en un 5% las emisiones de CO_2 de la aviación internacional para 2030 mediante el uso de SAF, LCAF y otras energías más limpias, en comparación con un escenario sin utilización de estas energías (OACI, 2023c). Este objetivo constituye un horizonte intermedio respecto del LTAG de 2050 y busca acelerar durante la presente década el desarrollo y despliegue de combustibles y energías de menor intensidad de carbono.

El Marco Mundial reconoce que alcanzar esta visión requiere condiciones que exceden el desarrollo tecnológico de los combustibles. Por esta razón, se estructura en cuatro ámbitos de acción interrelacionados: políticas y planificación, marcos regulatorios, apoyo a la implementación y financiamiento. Asimismo, la OACI mantiene el carácter objetivo

colectivo y aspiracional de este objetivo, sin asignar obligaciones individuales de reducción de emisiones a los Estados. Esta característica resulta relevante debido a que el desarrollo de combustibles sostenibles presenta diferencias importantes entre países en términos de recursos disponibles, capacidades tecnológicas, infraestructura, mercados energéticos y acceso a financiamiento. En consecuencia, el marco internacional no solo establece objetivos de reducción, sino que también reconoce la necesidad de generar condiciones para que los distintos países puedan desarrollar capacidades e incorporarse progresivamente a la transición energética de la aviación.

Desde la perspectiva de la industria, la Asociación Internacional de Transporte Aéreo (IATA) estableció el objetivo de alcanzar cero emisiones netas de CO_2 para el transporte aéreo mundial al año 2050. Esta meta fue adoptada por las aerolíneas miembros de la asociación en 2021 y constituye un compromiso de la industria que complementa el objetivo adoptado posteriormente por los Estados en el marco de la OACI (IATA, 2021). Dentro de la estrategia de descarbonización, el SAF ocupa un lugar central y la asociación estima que podría aportar hasta un 65% de las reducciones de emisiones necesarias para que la aviación alcance el objetivo de cero emisiones netas de CO_2 al año 2050 (IATA, 2026).

La tabla 2.1 sintetiza los principales objetivos y mecanismos internacionales revisados, destacando sus horizontes temporales y características principales.

Tabla 2.1: *Síntesis de los principales objetivos y mecanismos internacionales de descarbonización de la aviación.*

Instrumento	Referencia temporal	Característica principal
Acuerdo de París	Adoptado en 2015	Mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C y realizar refuerzos para limitarlo a 1,5 °C
LTAG - OACI	Horizonte 2050	Objetivo global aspiracional de cero emisiones netas de carbono para la aviación internacional
CORSIA - OACI	Fases 2021-2035	Mecanismo mundial de compensación y reducción de emisiones de CO_2 de la aviación internacional
CAAF/3 - OACI	Horizonte 2030	Meta colectiva aspiracional de reducir un 5% las emisiones de CO_2 mediante SAF, LCAF y otras energías limpias, respecto de un escenario sin su utilización.
Compromiso IATA	Horizonte 2050	Alcanzar cero emisiones netas de CO_2; el SAF podría aportar hasta un 65% de las reducciones necesarias

Fuente: Elaboración propia con base en UNFCCC (2015), OACI (2022, 2023c, 2024) e IATA (2021, 2026).

2.1.4 Estrategias nacionales en Chile

El desarrollo de los Combustibles de Aviación Sostenibles (SAF) en Chile se encuentra en un conjunto de estrategias y políticas públicas relacionadas con la descarbonización, la transición energética y la transformación del sistema de transporte. En consecuencia, su incorporación dentro de la planificación nacional no se limita al ámbito aeronáutico, sino que se relaciona con instrumentos de carácter climático y energético que establecen objetivos de largo plazo para la reducción de emisiones y el desarrollo de nuevas fuentes y tecnologías energéticas. Dentro de este marco se encuentran la Ley N.º 21.455, Ley Marco de Cambio Climático, la Estrategia Climática de Largo Plazo, la Política Energética Nacional, la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde y el Plan de Acción de Hidrógeno Verde 2023-2030. Estos instrumentos constituyen el contexto general en el cual posteriormente se desarrolla una planificación específicamente orientada a los combustibles sostenibles de aviación.

La Ley N.º 21.455, Ley Marco de Cambio Climático, establece el marco jurídico general para la acción climática en Chile y fija como objetivo alcanzar y mantener la neutralidad de

emisiones de gases de efecto invernadero a más tardar al año 2050. Para avanzar hacia ese objetivo, la ley establece un conjunto de instrumentos de gestión climática y asigna responsabilidades institucionales para su elaboración, implementación y seguimiento. Su relación con el SAF es de carácter general, debido a que la normativa no establece una obligación específica de utilización de combustibles en la aviación. Su importancia para esta investigación radica, por tanto, en que proporciona el marco legal dentro del cual deben desarrollarse las políticas y medidas sectoriales destinadas a reducir las emisiones de transporte y avanzar hacia la carbono neutralidad (Chile, 2022).

En relación con este marco jurídico se encuentra la Estrategia Climática de Largo Plazo (ECLP), instrumento que establece una visión de largo plazo para la transición del país hacia un desarrollo bajo en emisiones y resiliente al cambio climático. La estrategia aborda diferentes sectores de la economía y establece metas y lineamientos destinados a orientar la acción climática nacional. En el caso del transporte aéreo, este marco adquiere relevancia debido a las características particulares de su descarbonización y a la necesidad de considerar distintas alternativas tecnológicas y energéticas. Sin embargo, la ECLP constituye un instrumento transversal y no una estrategia específica de SAF, por lo que la incorporación de estos combustibles se desarrolla posteriormente mediante instrumentos sectoriales más específicos (Ministerio del Medio Ambiente, 2021).

Desde la perspectiva energética, la Política Energética Nacional constituye otro antecedente relevante para el desarrollo del SAF, ya que establece orientaciones de largo plazo para la transformación del sistema energético chileno. La política incorpora objetivos asociados a la transición energética, la reducción de emisiones y el desarrollo de nuevas tecnologías y fuentes de energía, relación que resulta especialmente relevante para aquellas rutas de producción de SAF que requieren electricidad de bajas emisiones, hidrógeno verde o derivados energéticos producidos a partir de fuentes renovables. De esta manera, el desarrollo de determinadas alternativas de SAF depende de condiciones que forman parte de una transformación energética más amplia y que no se encuentran restringidas exclusivamente al sector aeronáutico (Ministerio de Energía, 2022).

En este ámbito adquieren una particular importancia la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde y el Plan de Acción de Hidrógeno Verde 2023–2030, ya que estos instrumentos buscan

establecer las condiciones para el desarrollo de una industria nacional de hidrógeno verde y sus derivados, considerando aspectos relacionados con regulación, infraestructura, capacidades, inversión y desarrollo de mercados. La relación con los SAF se produce principalmente en aquellas rutas de producción de combustibles sintéticos que utilizan hidrógeno de bajas emisiones como insumo. No obstante, la existencia de una estrategia nacional de hidrógeno verde no implica que toda su producción se destine al sector aeronáutico, debido a que el hidrógeno puede utilizarse en diferentes sectores productivos y energéticos. Por ello, su vínculo con el SAF debe entenderse como una relación entre políticas que pueden proporcionar condiciones para determinadas alternativas de producción y no como una estrategia exclusivamente destinada a la aviación (Ministerio de Energía, 2020, 2024).

Dentro del ámbito aeronáutico, el Programa Vuelo Limpio constituye un antecedente directamente relacionado con el desarrollo de combustibles sostenibles. La iniciativa ha permitido generar instancias de trabajo entre organismos públicos y actores de la industria aeronáutica y energética, incluyendo actividades relacionadas con la eficiencia energética y la reducción de emisiones del transporte aéreo. En el contexto específico del SAF, este trabajo permitió conformar una Mesa SAF público-privada, orientada a reunir antecedentes provenientes de actores vinculados con la aviación, los combustibles y las materias primas potencialmente utilizables en la producción de estos combustibles. Los antecedentes levantados a través de este proceso sirvieron posteriormente como base para la elaboración de la Hoja de Ruta SAF 2050. La documentación disponible identifica, entre las brechas levantadas, aspectos relacionados con los costos de producción, la regulación y las capacidades necesarias para el desarrollo de esta industria (Programa Vuelo Limpio, s.f.).

A partir de este proceso se elaboró la Hoja de Ruta SAF 2050, que constituye el instrumento nacional específicamente orientado al desarrollo de los combustibles sostenibles de aviación. La Hoja de Ruta establece como meta para el año 2050 que los SAF representen el 50% del combustible utilizado en la aviación nacional e internacional de Chile. El documento caracteriza esta meta como aspiracional, vinculándola con los compromisos climáticos nacionales y con las estrategias energéticas que forman parte del proceso de descarbonización del transporte aéreo. Por ello, la meta debe entenderse como una orientación de planificación de largo plazo y no como una obligación legal vigente que establezca por sí misma un

porcentaje anual obligatorio de utilización de SAF (Ministerio de Energía et al., 2024).

Para orientar el cumplimiento de esta meta, la Hoja de Ruta estructura sus acciones en cinco ejes de trabajo: Formación de capacidades, Regulación, Desarrollo de mercado, Ecosistema SAF y Tecnología. La formación de capacidades aborda la generación y fortalecimiento de conocimientos y competencias requeridos para el desarrollo de la industria. El eje de regulación considera la adecuación de las condiciones normativas necesarias para facilitar el desarrollo de los SAF y abordar aspectos asociados a su producción, utilización y sostenibilidad. El desarrollo de mercado aborda las condiciones necesarias para favorecer la generación de oferta y demanda. El eje de ecosistema SAF se orienta a la coordinación y colaboración entre los distintos actores de la cadena de valor, mientras que el eje de tecnología considera la investigación, desarrollo e innovación asociada a las alternativas de producción y utilización de estos combustibles. La estructura de estos cinco ejes refleja que la estrategia contempla simultáneamente dimensiones regulatorias, económicas, institucionales, humanas y tecnológicas (Ministerio de Energía et al., 2024).

La Hoja de Ruta también establece una implementación progresiva mediante tres etapas. La primera corresponde a la Etapa de Preparación, orientada a generar estudios, desarrollar investigación inicial, establecer normativas, identificar recursos clave y crear las condiciones necesarias para el desarrollo de los SAF. La segunda corresponde a la Etapa de Desarrollo, que contempla acciones relacionadas con investigación aplicada, inversión en infraestructura, producción a pequeña escala y pruebas iniciales. La tercera etapa corresponde al proceso posterior de consolidación y expansión del desarrollo de los SAF. En consecuencia, el instrumento plantea una trayectoria gradual en la que la generación de información, regulación y capacidades precede al desarrollo productivo a mayor escala (Ministerio de Energía et al., 2024).

Otro elemento de la Hoja de Ruta corresponde a su estructura de coordinación institucional. El desarrollo de los SAF involucra organismos vinculados con transporte, energía y sostenibilidad, además de empresas, instituciones académicas, centros de investigación y otros participantes de la cadena de valor. Esta estructura responde a la naturaleza transversal del SAF, debido a que su desarrollo requiere articular materias primas, producción, certificación, infraestructura, distribución, consumo y condiciones de mercado. Por tanto, la

estrategia no plantea el desarrollo de estos combustibles exclusivamente como una actividad de las aerolíneas o de los productores de combustible, sino como un proceso que requiere coordinación entre distintos sectores.

Junto con la Hoja de Ruta, otro instrumento relacionado con la planificación nacional corresponde al Plan de Acción de Chile para la reducción de emisiones de CO_2 de la aviación civil internacional, presentado ante la OACI y actualizado en su segunda edición durante 2025. Los planes de acción estatales constituyen instrumentos mediante los cuales los Estados presentan sus medidas y estrategias para contribuir a la reducción de emisiones de la aviación internacional. La segunda edición correspondiente a Chile incorpora al SAF dentro del conjunto de medidas consideradas para la reducción de emisiones del sector y toma antecedentes asociados a la planificación nacional y a los estudios desarrollados para evaluar su utilización. De esta manera, el SAF se encuentra incorporado tanto en la estrategia nacional específica como en el instrumento mediante el cual Chile presenta ante la OACI sus medidas de mitigación para la aviación internacional (Plan de Acción de Chile, 2025).

Un antecedente posterior corresponde al Estudio de Factibilidad sobre el Uso de Combustibles Sostenibles de Aviación en Chile, desarrollado por la OACI en el marco del programa ACT-SAF. A diferencia de la Hoja de Ruta, cuyo propósito principal corresponde a establecer una orientación estratégica y un conjunto de acciones, este estudio busca profundizar en las condiciones concretas para la producción y utilización de SAF en el país. Para ello, considera aspectos relacionados con materias primas, rutas tecnológicas, infraestructura, logística, regulación, mercado, disponibilidad de recursos y condiciones de implementación. El estudio identifica distintas alternativas tecnológicas que pueden ser consideradas en Chile y analiza los requerimientos asociados a cada una de ellas. El documento disponible en los antecedentes de esta investigación contempla, además, acciones futuras relacionadas con la identificación de recursos, localizaciones apropiadas para proyectos, disponibilidad de CO_2 biogénico, recursos hídricos y análisis de instrumentos nacionales que podrían incidir en la producción y suministro de SAF (Lecocq, 2025).

La existencia de este estudio permite diferenciar entre la planificación estratégica del SAF y el análisis de las condiciones necesarias para su eventual implementación. Mientras la Hoja de Ruta establece una dirección de largo plazo, el estudio de factibilidad incorpora

antecedentes técnicos y económicos destinados a determinar qué alternativas pueden ser desarrolladas bajo las condiciones nacionales. Esta diferencia es relevante para la investigación, debido a que permite posteriormente contrastar las metas y líneas de acción establecidas en la planificación con las condiciones reales de producción, infraestructura, regulación, mercado y disponibilidad de recursos.

El proceso de análisis ha continuado durante 2026 mediante el desarrollo de un Business Implementation Study (BIS) asociado al trabajo de OACI y Vuelo Limpio. Este estudio busca profundizar en alternativas concretas de producción y en sus condiciones de implementación, considerando aspectos técnicos, económicos, materias primas, infraestructura, logística, distribución y suministro. Entre las alternativas estudiadas se encuentran el coprocesamiento de aceites usados de cocina, la producción mediante Alcohol-to-Jet utilizando residuos agrícolas y cultivos energéticos, y la producción de combustibles sintéticos mediante rutas Fischer-Tropsch y Methanol-to-Jet utilizando hidrógeno verde y fuentes de CO_2 biogénico. Debido a que el estudio se encuentra en desarrollo, sus resultados no constituyen todavía evidencia de producción comercial de SAF en Chile, sino que forman parte del proceso de evaluación previo a la eventual implementación de proyectos (Junta de Aeronáutica Civil, 2026).

2.1.5 Experiencias internacionales en el desarrollo del SAF

El desarrollo de los Combustibles Sostenibles de Aviación (SAF) ha seguido diferentes trayectorias según las características de los mercados aeronáuticos, las capacidades productivas, la disponibilidad de materias primas y los instrumentos de política pública utilizados en cada país o región. Entre las experiencias que presentan mecanismos de política pública diferenciados se encuentran la Unión Europea, Estados Unidos y Brasil.

En la Unión Europea, el desarrollo del SAF se ha apoyado en un marco regulatorio específico mediante el Reglamento (UE) 2023/2405, conocido como ReFuelEU Aviation. Este establece porcentajes mínimos de combustibles de aviación sostenibles que deben ser suministrados en los aeropuertos comprendidos por el reglamento. La obligación comenzó con un mínimo de 2% a partir de 2025 y aumenta progresivamente hasta alcanzar 70% en 2050. Para los combustibles de aviación sintéticos se establecen, además, porcentajes mínimos específicos dentro de estas obligaciones, que alcanzan 35% en 2050 (Parlamento

Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2023).

El reglamento establece asimismo requisitos respecto de las materias primas y de la reducción de emisiones durante el ciclo de vida de los combustibles que pueden contabilizarse para el cumplimiento de las obligaciones. Los combustibles considerados para estos efectos deben cumplir los criterios de sostenibilidad y reducción de emisiones establecidos por la normativa europea. El instrumento también establece condiciones comunes para el suministro de SAF en los aeropuertos comprendidos por su ámbito de aplicación, buscando evitar diferencias entre operadores y aeropuertos que puedan afectar el desarrollo del mercado (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2023).

En Estados Unidos, el desarrollo del SAF se ha estructurado mediante una estrategia interinstitucional denominada Sustainable Aviation Fuel Grand Challenge. La iniciativa fue impulsada por el Gobierno federal y respaldada conjuntamente por los Departamentos de Energía, Agricultura y Transporte. Su hoja de ruta establece como objetivo alcanzar una producción nacional de 3.000 millones de galones de SAF por año en 2030, considerando combustibles capaces de lograr una reducción mínima del 50% de las emisiones de gases de efecto invernadero durante el ciclo de vida respecto del combustible convencional. Para 2050, establece como referencia una producción de 35.000 millones de galones anuales, equivalente al 100% del uso proyectado de combustible de aviación de Estados Unidos (U.S. Department of Energy et al., 2022).

La hoja de ruta estadounidense contempla acciones distribuidas a lo largo de la cadena de suministro, incluyendo investigación, desarrollo y demostración tecnológica, desarrollo de materias primas, escalamiento de tecnologías de conversión, infraestructura y coordinación entre organismos públicos y actores privados. Su formulación considera la participación de productores de combustibles, industria aeronáutica, fabricantes, organizaciones de investigación y academia, entre otros actores vinculados con el desarrollo del SAF. El enfoque busca reducir las barreras tecnológicas y productivas asociadas al escalamiento de la industria y aumentar progresivamente la disponibilidad de combustibles sostenibles (U.S. Department of Energy et al., 2022).

En América Latina, Brasil constituye un antecedente relevante por la incorporación del SAF dentro de su política nacional de combustibles sostenibles. La Ley N.º 14.993, de 2024, creó

el Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), cuyo objetivo es incentivar la investigación, producción, comercialización y uso energético del SAF en la matriz energética brasileña. La misma legislación establece que la Agencia Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) debe determinar las emisiones asociadas a las distintas rutas tecnológicas de producción de SAF mediante un análisis de ciclo de vida y procurar el alineamiento metodológico con los requisitos de elegibilidad y certificación establecidos por la OACI (Brasil, 2024).

La Ley N.º 14.993 estableció asimismo metas progresivas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero para las operaciones aéreas domésticas. La trayectoria comienza con una reducción mínima de 1% a partir de 2027, aumenta a 2% desde 2029 y continúa incrementándose anualmente hasta alcanzar 10% a partir de 2037. La base de cálculo corresponde al volumen de emisiones que producirían las operaciones domésticas realizadas por cada empresa aérea durante el año correspondiente, suponiendo la utilización de combustible fósil. La legislación contempla además la posibilidad de utilizar medios alternativos para el cumplimiento de las metas, de acuerdo con la reglamentación aplicable (Brasil, 2024).

Un antecedente relevante para el estado actual de esta política corresponde al Decreto N.º 13.094, de 12 de agosto de 2026, mediante el cual se reglamentó el ProBioQAV establecido por la Ley N.º 14.993. El decreto desarrolla las condiciones para la implementación del programa y define responsabilidades para organismos como la ANP y la Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). Asimismo, establece disposiciones relativas a los agentes sujetos a las obligaciones, al cálculo y cumplimiento de las metas de reducción de emisiones, a los mecanismos de certificación y a los Certificados de Sustentabilidade de Combustível Sustentável de Aviação (CS-SAF) (Brasil, 2026).

El decreto también establece instrumentos orientados a facilitar la producción, comercialización y utilización del SAF, incluyendo mecanismos vinculados al financiamiento y al desarrollo de proyectos, y dispone que la implementación del ProBioQAV se coordine con el Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE) y con la Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) (Brasil, 2026).

A septiembre de 2026, la implementación del marco regulatorio brasileño continúa mediante normas complementarias. En particular, la ANAC mantiene abierta una consulta pública hasta el 1 de octubre de 2026 para establecer las reglas aplicables al cumplimiento de las metas anuales de reducción de emisiones previstas por el ProBioQAV. La propuesta contempla mecanismos para medir y comprobar las reducciones de emisiones y establece alternativas para el cumplimiento de parte de las metas, dentro de los límites definidos por el Decreto N.º 13.094. Por consiguiente, mientras el marco legal y su reglamentación general ya se encuentran establecidos, determinados procedimientos específicos de monitoreo, comprobación y fiscalización todavía se encuentran en proceso de regulación complementaria (Ministério de Portos e Aeroportos, 2026).

Los antecedentes revisados muestran que el desarrollo del SAF depende tanto de los objetivos de descarbonización como de las condiciones y capacidades de cada país. Sin embargo, para evaluar su rol estratégico en Chile es necesario complementar estos antecedentes con enfoques que permitan interpretar sus implicancias ambientales, económicas, sociales y de adopción tecnológica. Para ello, el siguiente apartado presenta los principales conceptos y herramientas teóricas utilizados en esta investigación.

2.2 Marco teórico

Se presentan los conceptos utilizados para analizar el desarrollo del SAF desde una perspectiva integrada. Se consideran el Triple Bottom Line, la economía circular, la evaluación de ciclo de vida, las principales rutas tecnológicas de producción, las normas técnicas y los criterios de sostenibilidad, y la Teoría de Difusión de Innovaciones de Rogers. Estos conceptos permiten comprender las oportunidades y dificultades que enfrenta el desarrollo del SAF en Chile.

2.2.1 Triple Bottom Line

El enfoque Triple Bottom Line (TBL) fue desarrollado y difundido por John Elkington durante la década de 1990. El propio autor ha señalado que acuñó el término en 1994 y posteriormente desarrolló el concepto con mayor amplitud en Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business, publicado en 1997. Su propuesta surgió como una ampliación de la evaluación tradicional del desempeño organizacional, que se centraba principalmente en los resultados económicos, incorporando también los efectos sociales y ambientales de las actividades desarrolladas (Elkington, 2004).

La idea central del Triple Bottom Line es que el desempeño de una actividad no debe evaluarse exclusivamente en términos de utilidad o rentabilidad, sino considerando simultáneamente tres dimensiones, siendo estas la económica, social y ambiental. Esta propuesta suele sintetizarse mediante las denominadas "3P": **People, Planet y Profit**, que representan respectivamente las dimensiones social, ambiental y económica. De esta manera, *People* se relaciona con los efectos de las actividades sobre las personas, las comunidades y otros grupos de interés; *Planet* considera los efectos sobre el medio ambiente y los recursos naturales; y *Profit* corresponde a los resultados económicos y a la generación de valor. En este enfoque, una actividad puede presentar resultados económicos favorables y, al mismo tiempo, generar efectos ambientales o sociales desfavorables. De igual manera, un beneficio ambiental no permite por sí solo determinar la sostenibilidad de una alternativa si esta presenta restricciones económicas o impactos sociales relevantes. El enfoque busca, por tanto, considerar conjuntamente estas tres dimensiones y las posibles interacciones o tensiones que pueden producirse entre ellas.

2.2.2 Economía circular

La economía circular no corresponde a una teoría originada en un único autor, sino que se ha desarrollado a partir de diversos aportes relacionados con la gestión de los recursos, los límites ambientales y la relación entre los sistemas económicos y naturales. Entre sus antecedentes conceptuales asociados posteriormente al desarrollo de la economía circular se encuentra el trabajo de Kenneth Boulding, particularmente su ensayo The Economics of the Coming Spaceship Earth (1966), en el que planteó la necesidad de comprender la actividad económica dentro de un planeta con recursos finitos y capacidad limitada para absorber residuos, contrastando una economía abierta basada en la explotación continua de recursos con una economía cerrada en la que los materiales deben integrarse a sistemas ecológicos cíclicos (Boulding, 1966).

En su formulación contemporánea, la economía circular busca superar el modelo lineal basado en la extracción de recursos, producción, uso y disposición de residuos, promoviendo sistemas que permitan mantener los productos, componentes y materiales en circulación durante el mayor tiempo posible y reducir la generación de residuos. La Ellen MacArthur Foundation establece tres principios fundamentales para este enfoque: eliminar los residuos y la contaminación desde el diseño, mantener los productos y materiales en circulación en su mayor valor posible y regenerar la naturaleza (Ellen MacArthur Foundation, s. f.).

La economía circular también ha sido objeto de estandarización internacional. La norma ISO 59004:2024, perteneciente a la familia de normas ISO 59000, establece vocabulario, principios y orientaciones para la implementación de la economía circular. Esta norma plantea un enfoque orientado a la gestión sostenible de los recursos, la conservación y creación de valor, la resiliencia de los sistemas y la participación de las partes interesadas (International Organization for Standardization [ISO], 2024).

En términos generales, la economía circular busca desacoplar la generación de valor económico del consumo de recursos finitos mediante estrategias destinadas a prevenir la generación de residuos, mantener productos y materiales en uso y regenerar los sistemas naturales. En este enfoque, la utilización de residuos o subproductos como insumos puede contribuir a la circulación de recursos, pero no constituye por sí misma una condición suficiente para determinar que una actividad o proceso sea circular. La evaluación de la circularidad requiere considerar aspectos como el origen y disponibilidad de los recursos, sus

usos alternativos, la conservación de su valor, la generación de residuos y los impactos asociados a las distintas etapas del sistema.

2.2.3 Evaluación de ciclo de vida

La Evaluación de Ciclo de Vida (ECV), denominada Life Cycle Assessment (LCA) en inglés, es una metodología utilizada para evaluar los aspectos ambientales y los impactos potenciales asociados a un producto, proceso o servicio considerando las distintas etapas de su ciclo de vida. Esta metodología permite analizar de manera sistemática las entradas de materiales y energía, así como las salidas y emisiones asociadas al sistema evaluado (Scientific Applications International Corporation [SAIC], 2006).

Una característica fundamental de la ECV es su perspectiva de ciclo de vida, mediante la cual se consideran las diferentes etapas que forman parte del sistema analizado. Esta perspectiva permite obtener una visión integral de los aspectos ambientales asociados al sistema, evitando concentrar la evaluación únicamente en una etapa determinada (SAIC, 2006).

El marco de la ECV se encuentra establecido principalmente en las normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006. La ISO 14040:2006 establece los principios y el marco general para los estudios de ECV, mientras que la ISO 14044:2006 establece los requisitos y directrices para su realización (International Organization for Standardization [ISO], 2006a, 2006b).

De acuerdo con la ISO 14040:2006, un estudio de ECV comprende cuatro fases principales: definición del objetivo y alcance, análisis del inventario del ciclo de vida, evaluación de impactos del ciclo de vida e interpretación de los resultados (ISO, 2006a).

La primera fase corresponde a la definición del objetivo y alcance, en la cual se establece el propósito del estudio, el sistema que será analizado y los límites considerados. El análisis del inventario del ciclo de vida comprende la recopilación y cuantificación de las entradas y salidas asociadas al sistema dentro de los límites establecidos. Posteriormente, la evaluación de impactos del ciclo de vida permite evaluar los impactos ambientales potenciales asociados a los resultados del inventario, mientras que la interpretación comprende el análisis de los resultados obtenidos en relación con el objetivo y alcance definidos (ISO, 2006a).

La ECV puede considerar diferentes categorías de impacto ambiental, dependiendo del objetivo y alcance definido para el estudio y del método de evaluación seleccionado. Entre estas pueden encontrarse categorías relacionadas con el cambio climático, acidificación, eutrofización y consumo de recursos, entre otras (SAIC, 2006).

Los resultados de una ECV dependen de elementos como los límites del sistema, los datos utilizados y los supuestos establecidos para el estudio. Por esta razón, la definición del objetivo y alcance constituye un elemento fundamental para determinar las características y extensión de la evaluación realizada (ISO, 2006a).

2.2.4 Rutas tecnológicas SAF

Los Combustibles Sostenibles de Aviación (SAF) pueden producirse mediante diferentes rutas de conversión, las cuales permiten transformar distintas materias primas en combustibles aptos para su utilización en el sector aeronáutico. La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) en el Anexo 16, Volumen IV, define un proceso de conversión como el tipo de tecnología utilizada para transformar una materia prima en combustible de aviación. Estas rutas presentan diferencias en cuanto a las materias primas a utilizar, las etapas de procesamiento y las características del combustible obtenido (OACI, s. f.-a).

La aprobación de una ruta de conversión se encuentra asociada a procesos de evaluación y certificación desarrollados por organismos como ASTM International. A la fecha la OACI identifica 11 procesos de conversión aprobados para la producción de SAF, mientras que hay otros procesos en evaluación. Los procesos aprobados presentan diferentes materias primas posibles y límites máximos de mezcla con combustible de aviación convencional, dependiendo de las características del proceso y del combustible producido (OACI, s. f.-a).

Referencia ASTM	Proceso de conversión	Abreviatura	Posibles materias primas	Relación de mezcla máxima
ASTM D7566 Anexo A1	Queroseno parafínico sintetizado mediante hidroprocesamiento Fischer–Tropsch	FT	Carbón, gas natural, biomasa	50%
ASTM D7566 Anexo A2	Queroseno parafínico sintetizado a partir de ésteres y ácidos grasos hidroprocesados.	HEFA	Aceites vegetales, grasas animales, aceites de cocina usados	50%
ASTM D7566 Anexo A3	Isoparafinas sintetizadas a partir de azúcares fermentados hidroprocesados.	SIP	Biomasa utilizada para la producción de azúcar.	10%
ASTM D7566 Anexo A4	Queroseno sintetizado con aromáticos derivados por alquilación de aromáticos ligeros de fuentes no petrolíferas.	FT-SKA	Carbón, gas natural, biomasa	50%
ASTM D7566 Anexo A5	Alcohol para queroseno parafínico sintético	ATJ-SPK	Etanol, isobutanol e isobuteno procedentes de biomasa	50%
ASTM D7566 Anexo A6	Combustible para aviones obtenido mediante hidrotermólisis catalítica	CHJ	Aceites vegetales, grasas animales, aceites de cocina usados	50%
ASTM D7566 Anexo A7	Queroseno parafínico sintetizado a partir de ésteres hidroprocesados de hidrocarburos y ácidos grasos.	HC-HEFA-SPK	Algas	10%
ASTM D7566 Anexo A8	Queroseno parafínico sintético con aromáticos	ATJ-SKA	Alcoholes C2–C5 procedentes de biomasa	
ASTM D1655 Anexo A1	Co-hidroprocesamiento de ésteres y ácidos grasos en una refinería de petróleo convencional.		Aceites vegetales, grasas animales, aceites de cocina usados procedentes de biomasa procesada con petróleo.	5%
ASTM D1655 Anexo A1	Co-hidroprocesamiento de hidrocarburos Fischer–Tropsch en una refinería de petróleo convencional		Hidrocarburos Fischer–Tropsch coprocesados con petróleo	5%
ASTM D1655 Anexo A1	Coprocesamiento de HEFA		Ésteres/ácidos grasos hidroprocesados a partir de biomasa.	10%

Figura 2.1. *Procesos de conversión de SAF aprobados. Fuente: OACI, s. f.-a*

Entre los procesos de conversión aprobados se encuentran las rutas Fischer-Tropsch (FT), Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA) y Alcohol-to-Jet (AtJ). Estas tres rutas son identificadas por la OACI dentro de los principales procesos de conversión disponibles para la producción de SAF (OACI, 2023b). A continuación, se describen sus principales características, materias primas y etapas de transformación.

1) Fischer-Tropsch (FT)

La ruta Fischer-Tropsch (FT) corresponde a un proceso de conversión termoquímica mediante el cual se producen hidrocarburos sintéticos a partir de un gas de síntesis (syngas), compuesto principalmente por monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H_2). Cuando se utilizan materias primas solidas como biomasa o residuos, estas deben ser previamente transformadas mediante un proceso de gasificación para obtener el gas de síntesis que posteriormente será utilizado en la síntesis Fischer-Tropsch (Okolie et al., 2023).

De manera general, el proceso puede dividirse en las siguientes etapas (Okolie et al., 2023):

- Preparación de la materia prima: Acondicionamiento, reducción del tamaño y preparación del material para facilitar su posterior conversión.
- Gasificación: Transformación termoquímica de la materia prima mediante altas temperaturas y una cantidad controlada de agente gasificante, generando un gas que contiene principalmente CO, H_2 y otros componentes.
- Acondicionamiento del gas de síntesis: Limpieza y ajuste de la composición del gas para adecuarlo a las condiciones requeridas por la síntesis Fischer-Tropsch.
- Síntesis Fischer-Tropsch: Conversión catalítica del CO y H_2 en cadenas de hidrocarburos de distinta longitud.
- Procesamiento y separación: Tratamiento posterior de los productos obtenidos para obtener las fracciones de hidrocarburos requeridas.

Las materias primas asociadas a esta ruta pueden incluir biomasa, residuos forestales y residuos sólidos urbanos. También pueden utilizarse otras fuentes de carbono capaces de ser transformadas en gas de síntesis mediante gasificación (Okolie et al., 2023)

La OACI identifica entre las materias primas para el proceso FT aprobado, biomasa, carbón y gas natural (OACI, s. f.-a).

En el caso de FT-SPK (Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene) aprobado bajo ASTM D7566, el límite máximo de mezcla establecido es de 50% (OACI, s. f.-a).

2) Alcohol-to-Jet (AtJ)

La ruta Alcohol-to-Jet (AtJ) utiliza alcoholes como intermediarios para producir hidrocarburos que posteriormente pueden ser acondicionados para obtener combustible de aviación. Entre los alcoholes empleados en las rutas aprobadas se encuentran el etanol y el isobutanol (OACI, s. f.-a).

La conversión del alcohol en hidrocarburos comprende, de manera general, las siguientes etapas (Okolie et al., 2023):

- Producción y acondicionamiento del alcohol: Obtención del alcohol a partir de la materia prima seleccionada y preparación para su utilización como intermediario.
- Deshidratación: Eliminación de agua de las moléculas de alcohol para producir olefinas.
- Oligomerización: Unión de moléculas de menor tamaño para formar cadenas de hidrocarburos de mayor longitud.
- Hidrogenación e hidrotratamiento: Estabilización y acondicionamiento de los hidrocarburos obtenidos mediante reacciones con hidrógeno.
- Separación y fraccionamiento: Separación de las diferentes fracciones obtenidas para recuperar aquellas destinadas a la producción de combustible de aviación.

Las materias primas empleadas para producir los alcoholes pueden incluir recursos ricos en azúcares o almidón, así como también materiales lignocelulósicos y residuos agrícolas, dependiendo de la tecnología utilizada para la obtención del alcohol (Okolie et al., 2023).

El ATJ-SPK (Alcohol-to-Jet Synthetic Paraffinic Kerosene) se encuentra aprobado bajo ASTM D7566 y presenta un límite máximo de mezcla de 50 % (OACI, s. f.-a).

3) Esteres y Ácidos Grasos Hidro-procesados (HEFA)

La ruta Ésteres y Ácidos Grasos Hidro-procesados, o en inglés**,** Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA) utiliza materias primas constituidas principalmente por aceites, grasas y otros compuestos lipídicos. Su transformación se basa en procesos de hidrogenación e hidrotratamiento destinados a eliminar el oxígeno presente en los compuestos de partida y convertirlos en hidrocarburos adecuados para la producción de combustible de aviación (Okolie et al., 2023).

De manera general, el proceso comprende las siguientes etapas (Okolie et al., 2023):

- Pretratamiento de la materia prima: Eliminación de impurezas y acondicionamiento de los aceites o grasas para su procesamiento.
- Hidrotratamiento e hidrodesoxigenación: Reacción de los compuestos lipídicos con hidrógeno en presencia de catalizadores, permitiendo la eliminación del oxígeno y la transformación de los compuestos en hidrocarburos.
- Hidroisomerización: Modificación de la estructura molecular de los hidrocarburos obtenidos.
- Hidrocracking: Ruptura de moléculas de mayor tamaño para obtener hidrocarburos dentro del intervalo de longitud de cadena requerido.
- Separación y fraccionamiento: Separación de las distintas corrientes producidas y recuperación de fracciones correspondientes.

Entre las materias primas asociadas a la ruta HEFA se encuentran los aceites vegetales, los aceites animales y los aceites de cocina usados (OACI, s. f.-a).

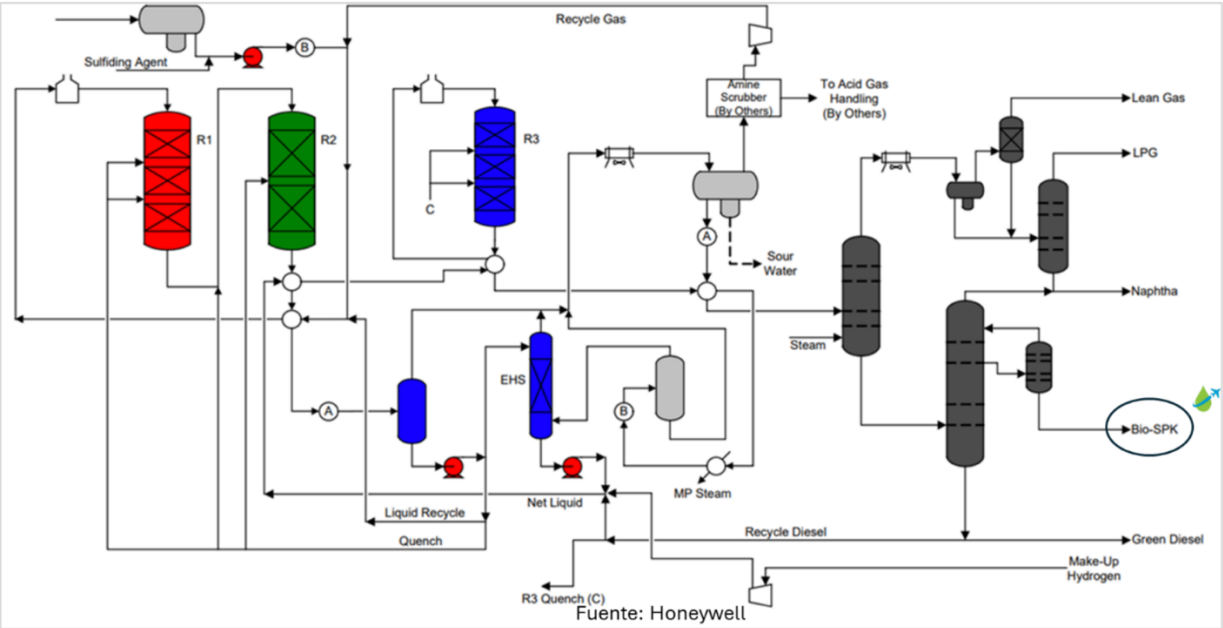


***Figura 2.2**. Proceso de producción mediante la ruta HEFA. Fuente:Lecocq, 2025, basado en Honeywell*

La representación del proceso permite visualizar las principales corrientes involucradas en la producción mediante HEFA, incluyendo el ingreso de la materia prima, el uso de hidrógeno, las etapas de tratamiento y separación y la obtención de diferentes productos y subproductos. Entre las corrientes obtenidas se encuentran la fracción destinada a combustible de aviación, además de otras como diésel renovable, nafta y gases (Lecocq, 2025).

En el caso del HEFA-SPK (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids Synthetic Paraffinic Kerosene) aprobado bajo ASTM D7566, el límite máximo de mezcla establecido es de 50% (OACI, s. f.-a).

2.2.5 Criterios CORSIA y normas ASTM

La utilización de combustibles sostenibles de aviación requiere considerar tanto las condiciones técnicas asociadas a su utilización como los criterios de sostenibilidad aplicables a su reconocimiento dentro de los mecanismos internacionales. En este contexto, las normas desarrolladas por ASTM International y el marco establecido por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) mediante CORSIA cumplen funciones diferentes dentro del proceso de producción, certificación y reconocimiento de los combustibles de aviación sostenibles.

2.2.5.1 Normas ASTM aplicables a SAF

ASTM International desarrolla normas técnicas aplicables a los combustibles de aviación y a los procesos utilizados para incorporar nuevos componentes sintéticos al combustible aeronáutico. En el caso de los SAF, dos referencias relevantes corresponden a ASTM D4054 y ASTM D7566, las cuales forman parte del proceso de evaluación y aprobación de nuevas rutas y componentes de combustible (OACI, 2023a).

La ASTM D4054 establece la práctica utilizada para la evaluación de nuevos combustibles de turbina de aviación y componentes de mezcla. El proceso considera diferentes niveles de evaluación técnica, incluyendo análisis de propiedades, ensayos y revisión de los resultados antes de avanzar hacia la aprobación de una nueva especificación (OACI, 2023a).

Una vez completado el proceso de evaluación y aprobación correspondiente, el nuevo componente puede incorporarse a una especificación ASTM mediante un anexo específico.

En el caso de los combustibles que contienen hidrocarburos sintetizados, esta función corresponde a la ASTM D7566 (OACI, 2023a).

La ASTM D7566, denominada Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons, establece los requisitos mínimos de propiedades para combustibles de turbina de aviación que contienen componentes sintéticos. La especificación contempla la utilización de componentes sintéticos mezclados con combustible convencional y establece los requisitos aplicables al combustible en el punto de origen del lote (ASTM International, 2026).

La ASTM D7566 incorpora diferentes rutas de producción mediante anexos específicos. Entre ellas se encuentran Fischer-Tropsch (FT), HEFA, SIP y ATJ, además de otras rutas aprobadas. La especificación establece para cada proceso las condiciones correspondientes para la incorporación de los componentes sintéticos al combustible de aviación (ASTM International, 2026).

Una vez que un combustible ha sido certificado y liberado de acuerdo con los requisitos establecidos por ASTM D7566, este cumple los requisitos correspondientes de la especificación ASTM D1655 y puede ser considerado combustible de turbina de aviación conforme a dicha especificación (ASTM International, 2026).

Por lo tanto, las normas ASTM permiten establecer un marco técnico para evaluar nuevas rutas de producción y determinar las características que deben cumplir los combustibles y componentes sintéticos destinados a su utilización en aviación. La aprobación de una ruta tecnológica bajo este marco no constituye, por sí sola, una evaluación de sostenibilidad ambiental, sino que corresponde a un proceso de carácter técnico asociado a las características y desempeño del combustible.

2.2.5.2 Criterios de sostenibilidad CORSIA

El Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA) es el esquema de la OACI destinado a abordar las emisiones de CO_2 de la aviación internacional mediante mecanismos de seguimiento, reporte, verificación y compensación. Dentro de este esquema se consideran los denominados CORSIA Eligible Fuels (CEF), categoría que comprende los combustibles que cumplen los requisitos establecidos para generar beneficios reconocibles dentro de CORSIA (OACI, 2026a).

La OACI define un CORSIA Sustainable Aviation Fuel (SAF) como un combustible de aviación renovable o derivado de residuos que cumple los criterios de sostenibilidad establecidos por CORSIA. Estos criterios permiten evaluar el combustible considerando, entre otros elementos, sus emisiones de gases de efecto invernadero durante el ciclo de vida y las condiciones asociadas a la producción de la materia prima y del combustible (OACI, 2026a).

Los criterios de sostenibilidad de CORSIA se organizan en diferentes ámbitos relacionados con el desempeño ambiental y social de los combustibles. Entre las materias consideradas por el marco se encuentran las emisiones de ciclo de vida, la conservación, la gestión de residuos y productos químicos, los derechos humanos y laborales, los derechos de uso de la tierra, los derechos de uso del agua, el desarrollo local y social y la seguridad alimentaria (Lecocq, 2025).

La evaluación de las emisiones de ciclo de vida constituye un componente relevante dentro del marco CORSIA. Para ello, la OACI mantiene valores predeterminados de emisiones de ciclo de vida para determinadas combinaciones de materias primas y rutas de producción, además de una metodología para calcular valores reales cuando corresponde (OACI, 2026a).

El marco CORSIA también establece requisitos relacionados con la certificación de sostenibilidad. Los combustibles elegibles deben proceder de productores certificados mediante un Sustainability Certification Scheme (SCS) aprobado por el Consejo de la OACI, de manera que el cumplimiento de los criterios pueda ser verificado dentro del esquema (OACI, 2026a).

La OACI mantiene y actualiza periódicamente la documentación asociada a los combustibles elegibles CORSIA. Actualmente, el marco incluye la cuarta edición de los CORSIA Sustainability Criteria for CORSIA Eligible Fuels, publicada en junio de 2025, junto con documentos específicos para los valores predeterminados de emisiones de ciclo de vida y para el cálculo de emisiones reales (OACI, 2026a).

2.2.5.3 Relación ASTM y CORSIA

ASTM y CORSIA corresponden a marcos diferentes que intervienen en dimensiones distintas de los combustibles sostenibles de aviación. Por un lado, las normas ASTM se relacionan con la evaluación técnica, especificación y aprobación de componentes y

combustibles destinados a su utilización aeronáutica, mientras que CORSIA establece los requisitos de sostenibilidad y elegibilidad que permiten reconocer determinados combustibles dentro de su esquema (OACI, 2023a, 2026a).

En consecuencia, la aprobación de una ruta de producción bajo las normas ASTM y el cumplimiento de los criterios de sostenibilidad de CORSIA corresponden a procesos distintos, ya que un proceso de conversión puede encontrarse aprobado técnicamente bajo una especificación ASTM, mientras que la elegibilidad del combustible dentro de CORSIA requiere adicionalmente que cumpla los criterios de sostenibilidad y los mecanismos de certificación establecidos por la OACI (OACI, 2023a, 2026a).

Esta diferenciación permite distinguir entre las características técnicas que debe cumplir un combustible para su utilización como combustible de aviación y las condiciones ambientales y de sostenibilidad requeridas para su reconocimiento dentro de un mecanismo internacional de reducción de emisiones.

2.2.6 Teoría de difusión de innovaciones de Rogers

La Teoría de Difusión de Innovaciones fue desarrollada por Everett M. Rogers y presentada inicialmente en su obra Diffusion of Innovations, cuya primera edición fue publicada en 1962. En su quinta edición, Rogers (2003) define la difusión como el proceso mediante el cual una innovación es comunicada a través de determinados canales, durante un período de tiempo y entre los miembros de un sistema social.

La teoría considera cuatro elementos principales dentro del proceso de difusión: la innovación, los canales de comunicación, el tiempo y el sistema social. La innovación corresponde a una idea, práctica u objeto que es percibido como nuevo por un individuo u otra unidad de adopción. Los canales de comunicación corresponden a los medios mediante los cuales se transmite información sobre la innovación, mientras que el tiempo constituye una dimensión relevante para comprender tanto el proceso de decisión como la velocidad con que una innovación es adoptada. Finalmente, el sistema social corresponde al conjunto de unidades relacionadas que participan en el proceso de difusión (Rogers, 2003).

Proceso de decisión de innovación

Uno de los componentes centrales de la teoría corresponde al proceso de decisión de innovación, mediante el cual un individuo u otra unidad de adopción pasa desde el conocimiento inicial de una innovación hasta su adopción o rechazo. Rogers identifica cinco etapas principales dentro de este proceso:

- Conocimiento: Ocurre cuando el individuo o unidad de adopción conoce la existencia de una innovación y cómo funciona.
- Persuasión: Corresponde a la etapa en que se desarrolla una opinión favorable o desfavorable hacia la innovación.
- Decisión: Implica elegir adoptar o rechazar la innovación.
- Implementación: Ocurre cuando la innovación empieza a ser utilizada.
- Confirmación: Corresponde a tomar la decisión de continuar o interrumpir el uso de la innovación.

El proceso de decisión de innovación posee una dimensión temporal y las etapas normalmente se desarrollan en el orden señalado. Sin embargo, la secuencia puede variar dependiendo de las características de la decisión y de la unidad que adopta la innovación (Rogers, 2003).

Atributos de las innovaciones

Rogers plantea que determinadas características percibidas de una innovación influyen en la velocidad con la que es adoptada. Se identifican cinco atributos principales:

- Ventaja relativa: Corresponde al grado en que una innovación es percibida como superior a la idea o alternativa que reemplaza.
- Compatibilidad: Corresponde al grado en que una innovación es percibida como consistente con los valores existentes, experiencias previas y necesidades de los potenciales adoptantes.
- Complejidad: Corresponde al grado en que una innovación es percibida como difícil de comprender o utilizar.
- Posibilidad de prueba: Corresponde al grado en que una innovación puede ser probada de manera limitada antes de adoptar una decisión definitiva.

- Observabilidad: Corresponde al grado en que los resultados asociados a una innovación pueden ser observados por otras personas.

De acuerdo con Rogers, las innovaciones percibidas como poseedoras de una mayor ventaja relativa, compatibilidad, posibilidad de experimentación y observabilidad, y una menor complejidad, tienden a presentar una adopción más rápida que aquellas que presentan características menos favorables en estas dimensiones (Rogers, 2003).

Categorías de adoptantes

La teoría también clasifica a los miembros de un sistema social de acuerdo con su grado de innovación, entendido como la relativa anticipación con que una unidad de adopción incorpora una innovación en comparación con los demás miembros del sistema. A partir de esta dimensión, Rogers establece cinco categorías de adoptantes: innovadores, adoptantes tempranos, mayoría temprana, mayoría tardía y rezagados (Rogers, 2003).

Estas categorías permiten representar las diferencias existentes en el momento en que los miembros de un sistema adoptan una innovación. Los innovadores corresponden a quienes adoptan nuevas ideas relativamente antes que los demás; los adoptantes tempranos presentan una adopción temprana y desempeñan un papel relevante dentro de sus sistemas sociales; la mayoría temprana adopta una innovación antes que el miembro promedio del sistema; la mayoría tardía adopta después del miembro promedio y suele requerir mayores niveles de evidencia o presión social; finalmente, los rezagados corresponden a quienes presentan la adopción más tardía dentro del sistema (Rogers, 2003).

La clasificación no se basa únicamente en características individuales, sino principalmente en el momento relativo de adopción de una innovación dentro de un sistema social. Por ello, las categorías permiten comparar el comportamiento de adopción entre los distintos miembros de un sistema.

Tasa de adopción

Es definida como la velocidad relativa con que los miembros de un sistema social adoptan una innovación. Esta tasa permite analizar la rapidez con que una innovación se incorpora dentro del sistema a lo largo del tiempo.

Cuando el número acumulado de adoptantes se representa gráficamente en función del

tiempo, la difusión de una innovación suele presentar una curva en forma de S. En las primeras etapas, la cantidad de nuevos adoptantes es reducida; posteriormente, la tasa de adopción aumenta a medida que más miembros incorporan la innovación y, finalmente, la curva tiende a estabilizarse cuando disminuye el número de potenciales adoptantes que aún no la han incorporado (Rogers, 2003).

En conjunto, la Teoría de Difusión de Innovaciones permite comprender la adopción de una innovación como un proceso que depende de la interacción entre sus características percibidas, los mecanismos de comunicación, el tiempo y las características del sistema social en el que se desarrolla. De esta manera, la difusión no se limita a la existencia o disponibilidad de una nueva tecnología, sino que también considera el proceso mediante el cual los distintos miembros de un sistema conocen, evalúan, adoptan o rechazan dicha innovación.

En esta investigación, se utiliza la Teoría de Difusión de Innovaciones de Rogers porque permite analizar no solo el potencial técnico del SAF en Chile, sino también las condiciones que favorecen o dificultan su incorporación. Para ello, se utilizan los cinco atributos de la innovación como criterios para interpretar la evidencia disponible, sin pretender medir una tasa de adopción ni clasificar a Chile dentro de una categoría específica de adoptantes.

2.3 Propuesta metodológica

La propuesta metodológica contempla cuatro etapas vinculadas con los objetivos específicos, en donde en cada etapa se examinaron antecedentes documentales, se identificaron sus condiciones de interpretación y se relacionaron los resultados con la evaluación estratégica del SAF en Chile.

Etapa 1. **Análisis del posicionamiento del SAF en Chile:**

Se examinan las proyecciones de demanda de combustible de aviación, su concentración territorial, las materias primas potenciales, las rutas tecnológicas y la infraestructura relacionada con la producción y el suministro.

Se distingue la generación de recursos de su disponibilidad efectiva y las capacidades existentes de las instalaciones consideradas en escenarios futuros. También se revisan los supuestos que condicionan las proyecciones de producción, con el fin de identificar las oportunidades de desarrollo del SAF y sus principales restricciones técnicas productivas y logísticas.

Etapa 2. Evaluación ambiental, económica y social:

Los antecedentes se analizan mediante las tres dimensiones del enfoque Triple Bottom Line. En la ambiental se consideran las estimaciones disponibles de emisiones de ciclo de vida, las condiciones de producción y la valorización de residuos. En la económica se distinguen los costos de producción modelados, precios de mercado e inversiones estimadas. En la dimensión social se examinan las oportunidades de formación de capacidades, desarrollo de actividades productivas y generación de empleo, considerando las limitaciones de la evidencia disponible.

La evaluación conjunta permite identificar las relaciones entre el desempeño ambiental del SAF, su viabilidad económica y las capacidades necesarias para desarrollar una eventual industria nacional.

Etapa 3. Análisis de instrumentos regulatorios y económicos:

Se examinan los instrumentos considerados en las experiencias seleccionadas, identificando su función frente a las principales barreras del SAF: incertidumbre de demanda, diferencia

de costos, necesidades de inversión y exigencias de sostenibilidad.

Para Chile se analizan sus posibles aplicaciones considerando las condiciones nacionales de producción, suministro, infraestructura y desarrollo de mercado. Este análisis permite identificar qué instrumentos podrían complementarse y qué restricciones deben considerarse antes de su implementación.

Etapa 4. Análisis del proceso de adopción:

Se utiliza la Teoría de Difusión de Innovaciones de Rogers para interpretar la evidencia disponible mediante cinco atributos: ventaja relativa, compatibilidad, complejidad, posibilidad de prueba y observabilidad.

Cada atributo se relaciona con antecedentes técnicos, económicos y operativos, así como con las iniciativas y experiencias de actores involucrados. Se distingue las pruebas, los avances institucionales y la generación de información de la adopción comercial efectiva, con el fin de identificar las condiciones que favorecen o dificultan la incorporación del SAF.

Integración de resultados:

Finalmente, los resultados de las 4 etapas se relacionan para evaluar en qué medida el SAF puede contribuir a la descarbonización de la aviación en Chile y bajo qué condiciones podrían materializarse los beneficios adicionales en seguridad energética, valorización de residuos y desarrollo socioeconómico.

3. Desarrollo

3.1 Análisis del posicionamiento del SAF en Chile

A partir de los antecedentes revisados, se analiza el posicionamiento actual y proyectado de los Combustibles Sostenibles de Aviación (SAF) dentro del sistema aeronáutico y energético chileno. Para ello, se consideran la evolución de la demanda de combustibles de aviación, la disponibilidad potencial de materias primas, las principales rutas tecnológicas identificadas para su producción y el desarrollo de infraestructura asociado. De esta manera, se busca caracterizar las condiciones técnicas y productivas que determinan la incorporación progresiva del SAF en Chile.

3.1.1 Demanda de combustible de aviación y requerimientos

La demanda de combustible de aviación constituye una de las principales variables para dimensionar la incorporación del SAF al sistema energético nacional. De acuerdo al Estudio de Factibilidad sobre el Uso de Combustibles Sostenibles de Aviación en Chile, elaborado por OACI, la demanda nacional de combustible de aviación presenta una trayectoria creciente durante el período analizado, pasando de 1.703 mil m^3 en 2025 a 2.044 mil m^3 en 2030 y alcanzando 3.674 mil m^3 en 2050 (Lecocq, 2025).

En términos de infraestructura aeroportuaria, el estudio muestra una elevada concentración de la demanda en el Aeropuerto Arturo Merino Benítez (AMB). Para 2030, por ejemplo, el aeropuerto concentra aproximadamente 1.713 mil m^3 de los 2.044 mil m^3 proyectados a nivel nacional, equivalente a aproximadamente un 84% del total. Esta concentración constituye un antecedente relevante para el análisis de la infraestructura de abastecimiento y distribución requerida para una futura incorporación del SAF (Lecocq, 2025).

***Tabla 3.1**: Proyección de demanda nacional de combustible de aviación.*

Año	Demanda total de combustible de aviación (mil m^3)
2025	1.703
2030	2.044
2035	2.358
2040	2.728
2045	3.162
2050	3.674

Fuente: Elaboración propia con base en Lecocq (2025, p. 118, tabla 23).

A partir de esta proyección de demanda, el estudio de Lecocq (2025) desarrolla una

simulación del posible despliegue de la producción nacional de SAF. Utiliza 2030 como año de referencia para un suministro cercano al 4% de la demanda, aunque incluye volúmenes de producción desde 2027. Esta diferencia temporal forma parte del escenario de la fuente y no constituye evidencia de un inicio comercial confirmado. La simulación contempla posteriormente un aumento progresivo hasta aproximarse al 50% de la demanda nacional en 2050.

***Tabla 3.2**: Escenario proyectado de producción nacional de SAF.*

Año	Producción SAF proyectada (mil m^3)	Participación sobre demanda
2027	25	1%
2028	40	2%
2029	50	3%
2030	75	4%
2035	675	29%
2040	1.050	38%
2045	1.425	45%
2050	1.825	50%

Fuente: Elaboración propia con base en Lecocq (2025, p. 119, tabla 26).

Nota. Los porcentajes se presentan redondeados.

Las unidades corresponden a miles de metros cúbicos. Por lo tanto, los 75 mil m^3 proyectados para 2030 equivalen a 75 millones de litros, mientras que los 1.825 mil m^3 proyectados para 2050 equivalen a 1.825 millones de litros. La magnitud de esta diferencia permite dimensionar el aumento de producción considerado dentro del escenario analizado.

Es importante señalar que estos valores corresponden a una simulación de producción y despliegue, elaborada a partir de supuestos relacionados con la disponibilidad de materias primas, las tecnologías de conversión y la implementación progresiva de infraestructura. Por lo tanto, no representan producción efectiva ni capacidad instalada actualmente en Chile, sino un escenario de referencia para dimensionar la escala que podría alcanzar el desarrollo nacional del SAF.

3.1.2 Aceites de cocina usados

Los aceites de cocina usados (UCO, por sus siglas en inglés) constituyen una de las materias primas con mayor grado de avance para el desarrollo inicial del SAF en Chile, debido a que corresponden a un residuo que ya se genera de manera continua y que puede ser incorporado a tecnologías de producción consideradas para el país (Nogueira et al., 2026).

De acuerdo con el estudio publicado por la Agencia de Sostenibilidad Energética y desarrollado por Hinicio, Chile presenta un potencial de generación de aceites usados de cocina estimado en aproximadamente 128 mil toneladas anuales para 2024, cifra que podría aumentar aproximadamente a 143 mil toneladas anuales de UCO hacia 2035. Estos valores corresponden al potencial de generación del residuo y no a la cantidad que estaría efectivamente recuperada o disponible para producir combustible (Nogueira et al., 2026).

Para caracterizar la situación actual de recolección, el estudio estima que la captación formal de aceites usados de cocina en Chile representa entre el 9% y 12% del potencial generado. Sin embargo, este rango no constituye una medición exhaustiva de todo el UCO efectivamente recuperado, debido a las diferencias entre los registros disponibles, los antecedentes de las empresas recolectoras y las limitaciones de información y trazabilidad existentes (Nogueira et al., 2026).

El estudio considera el coprocesamiento en refinerías existentes como una alternativa inicial y analiza también la producción mediante plantas HEFA dedicadas. En el escenario optimista, que supone recolectar el 75% del potencial proyectado para 2035 y utilizar una configuración HEFA orientada a maximizar SAF, estima una producción cercana a 99 millones de litros anuales. Este volumen equivaldría aproximadamente al 4,1% de una demanda nacional de combustible de aviación estimada en 2.400 millones de litros para ese año (Nogueira et al., 2026).

Este resultado corresponde a un escenario de producción y no a una capacidad actualmente instalada. Además, el 4,1% se refiere al SAF obtenido mediante la configuración HEFA descrita, por lo que no debe atribuirse al coprocesamiento ni al nivel actual de recolección. Su materialización requiere mejorar los sistemas de captación, almacenamiento y acondicionamiento, y disponer de las condiciones técnicas y económicas para transformar el UCO recolectado.

En cuanto a la infraestructura, ENAP ha avanzado en la evaluación del coprocesamiento como alternativa para la producción nacional de SAF. Durante 2026, la empresa informó que se encontraba realizando pruebas técnicas destinadas a evaluar esta posibilidad utilizando infraestructura existente, por lo que esta alternativa debe considerarse actualmente como una

capacidad en evaluación técnica y no como producción comercial de SAF ya instalada (Agencia de Sostenibilidad Energética, 2026).

3.1.3 Biomasa forestal y residuos lignocelulósicos

La biomasa forestal constituye otra fuente potencial de materias primas para la producción de SAF, particularmente mediante rutas termoquímicas como la gasificación seguida de síntesis Fischer-Tropsch. Su relevancia se relaciona con la existencia de una industria forestal consolidada y con la generación de residuos provenientes de las actividades de manejo, cosecha y procesamiento de la madera.

De acuerdo con "Los recursos forestales en Chile 2024" del Instituto Forestal (INFOR), Chile registra 2.276.766 hectáreas de plantaciones forestales y 14.728.462 hectáreas de bosque nativo, correspondientes a las cifras incorporadas en dicha publicación (Sagardía Parga et al., 2024).

Estas cifras permiten dimensionar la magnitud de la base forestal existente en Chile, pero no representan directamente la cantidad de biomasa disponible para producir SAF. La superficie de bosques y plantaciones debe diferenciarse de la cantidad de residuos efectivamente generados, recuperables y técnicamente utilizables como materia prima.

En este sentido, el estudio de factibilidad de OACI identifica los residuos forestales como una de las fuentes de biomasa que podrían utilizarse en procesos de gasificación para la producción de SAF. Esta alternativa se incorpora dentro del escenario nacional de despliegue tecnológico considerado por OACI.

La disponibilidad efectiva de estos residuos dependerá, entre otros factores, de la generación de subproductos de la actividad forestal, su localización, los costos de recolección y transporte, sus usos actuales y las condiciones necesarias para asegurar un aprovechamiento sostenible.

Por esta razón, en el presente análisis la superficie forestal se utiliza como antecedente de disponibilidad del recurso forestal pero no se transforma directamente en toneladas de biomasa ni de litros de SAF. Esta diferenciación permite evitar sobreestimar el potencial

productivo de esta materia prima.

3.1.4 Residuos agrícolas: paja de trigo

Los residuos agrícolas constituyen una fuente adicional de biomasa lignocelulósica susceptible de ser utilizada en procesos de producción de SAF mediante gasificación. Entre estos recursos destaca la paja de trigo debido al volumen generado por la actividad agrícola nacional y su condición de residuo que puede ser valorizado energéticamente.

De acuerdo con antecedentes de ODEPA utilizados por OACI, durante el año agrícola 2023/2024 Chile registró una superficie cultivada de trigo de 198.079 hectáreas y una producción aproximada de 1.189.000 toneladas de trigo. A partir de la tecnología desarrollada por INIA para estimar rastrojos de cultivos anuales, OACI estima una producción nacional de aproximadamente 1.453.222 toneladas de paja de trigo para el mismo período (Lecocq, 2025).

La distribución territorial de este recurso presenta además una concentración significativa. La región de la Araucanía representa aproximadamente el 41% de la superficie cultivada de trigo y concentra, de acuerdo con la estimación presentada por OACI, aproximadamente 606 mil toneladas anuales de paja de trigo (Lecocq, 2025). Esta concentración constituye un antecedente relevante para analizar la eventual localización de instalaciones de valorización y las cadenas logísticas asociadas al abastecimiento de biomasa.

La paja de trigo es considerada por OACI como una materia prima con potencial de valorización para la producción de SAF mediante gasificación. Sin embargo, la cantidad total estimada de paja no corresponde automáticamente a la cantidad disponible para una planta. Su utilización efectiva dependerá de factores como la recolección, el transporte, el almacenamiento, la competencia con otros usos de los rastrojos y los criterios de sostenibilidad aplicables.

En consecuencia, los residuos agrícolas amplían la base potencial de materias primas disponibles para el desarrollo del SAF en Chile, pero su incorporación requiere el desarrollo de cadenas de suministro capaces de asegurar un abastecimiento técnicamente viable y sostenible.

3.1.5 Residuos sólidos municipales (RSM)

Los residuos sólidos municipales (RSM) representan otra fuente potencial de materia prima para tecnologías de producción de SAF basadas en gasificación. Su consideración resulta relevante debido al volumen generado en Chile y a la posibilidad de valorizar una fracción de estos residuos mediante procesos termoquímicos.

De acuerdo con el Informe Consolidado de Emisiones y Transferencias de Contaminantes del RETC 2022, durante 2022 se generaron en Chile más de 18 millones de toneladas de residuos. Los residuos municipales representaron el 46,50% del total registrado, equivalente a aproximadamente 8,6 millones de toneladas (Ministerio del Medio Ambiente, 2024).

La magnitud de esta corriente de residuos permite identificar un alto potencial como fuente de materia prima para procesos termoquímicos. Sin embargo, el volumen total de residuos municipales generado no equivale directamente al volumen disponible para producir SAF. La composición de los residuos, el contenido de humedad, la presencia de materiales no aprovechables, los sistemas de separación y las condiciones de recolección determinan la fracción que podría ser técnicamente utilizada en una planta de gasificación.

OACI incorpora los residuos sólidos municipales dentro de las materias primas consideradas para el desarrollo de plantas de gasificación en Chile, junto con residuos forestales y residuos agrícolas como la paja de trigo.

Por lo tanto, el potencial de los residuos municipales para el desarrollo del SAF no debe determinarse únicamente a partir de la cantidad total generada. Para establecer un volumen de producción de SAF sería necesario conocer la fracción técnicamente aprovechable, las características del residuo disponible en el área de influencia de una planta y el rendimiento específico de la tecnología utilizada.

3.1.6 Rutas tecnológicas y escenario de producción nacional

La diversidad de materias primas identificadas en Chile se relaciona directamente con las diferentes rutas tecnológicas consideradas para la producción nacional del SAF. El estudio de factibilidad de OACI contempla 5 alternativas principales dentro de su escenario de desarrollo: coprocesado, Power-to-Liquid Fischer-Tropsch (PtL FT), gasificación,

Methanol-to-Jet (MtJ) y Alcohol-to-Jet (AtJ) (Lecocq, 2025).

El escenario desarrollado por OACI considera al coprocesado como la primera alternativa de producción, asociado a la infraestructura de refinación existente. Posteriormente, se incorpora progresivamente al resto de las tecnologías, alcanzando una escala de producción significativamente mayor hacia 2050.

Tabla 3.3: Producción de SAF proyectada por tecnología para 2050.

Tecnología	Producción proyectada 2050 (mil m^3)	Participación
Coprocesado	75	4%
PtL FT	750	41%
Gasificación	675	37%
MtJ	100	5%
AtJ	225	12%
Total	1.825	100%

Fuente: Elaboración propia con base en Lecocq (2025, p. 119, tabla 26).

Nota. Las participaciones porcentuales por tecnología se presentan redondeadas; por ello, su suma puede diferir del 100%.

La composición tecnológica proyectada evidencia que el desarrollo futuro del SAF en Chile no depende de una única materia prima. Mientras el coprocesado puede utilizar infraestructura de refinación existente y materias primas como aceites y grasas residuales, la gasificación permite incorporar diferentes residuos lignocelulósicos, y las rutas PtL permiten producir SAF a partir de hidrógeno y fuentes de carbono mediante procesos de síntesis.

Por lo tanto, el escenario nacional proyectado contempla una diversificación progresiva de las fuentes y tecnologías de producción, lo que permite analizar el posicionamiento del SAF no solamente desde la disponibilidad de una materia prima específica, sino desde la capacidad del sistema energético para integrar distintas alternativas productivas.

Sin embargo, esta diversificación no implica que todas las tecnologías tengan la misma participación dentro del escenario proyectado. Para 2050, las rutas Power-to-Liquid Fischer-Tropsch y gasificación concentrarían conjuntamente aproximadamente el 78% de la producción nacional de SAF simulada por la OACI. Esto evidencia que la materialización del escenario dependería en gran medida del desarrollo de estas dos alternativas y de las condiciones de inversión, infraestructura y abastecimiento de recursos necesarias para su implementación (Lecocq, 2025).

La expansión de las rutas sintéticas requiere disponer conjuntamente de electricidad renovable, agua, hidrógeno y fuentes de CO_2 aptas, además de conexiones e infraestructura de transporte. El estudio identifica dificultades para reunir estas condiciones en los mismos emplazamientos, por lo que el potencial renovable nacional no equivale por sí solo a capacidad efectiva de producción de SAF (Lecocq, 2025).

3.1.7 Infraestructura y nivel de desarrollo actual

El análisis del posicionamiento del SAF requiere diferenciar entre las capacidades actualmente existentes, las iniciativas que se encuentran en evaluación y las instalaciones que corresponden exclusivamente a escenarios de desarrollo futuro.

En este contexto, Chile dispone de infraestructura de refinación operada por ENAP que puede constituir una base para evaluar una primera etapa de producción mediante coprocesamiento. El estudio de OACI incorpora una planta de coprocesado desde 2027 dentro de su escenario de despliegue. Sin embargo, esta cifra corresponde a una estimación de la simulación, y no significa que dicha planta se encuentre actualmente operativa (Lecocq, 2025).

Durante 2026, ENAP informó que se encontraba realizando pruebas técnicas para evaluar la producción nacional de SAF mediante coprocesamiento utilizando infraestructura existente. Por lo tanto, esta alternativa debe caracterizarse actualmente como una capacidad en evaluación técnica y no como producción comercial de SAF instalada (Agencia de Sostenibilidad Energética, 2026).

Al mismo tiempo, Chile ha avanzado desde la etapa de planificación hacia estudios específicos de implementación. Durante 2026 se inició el Business Implementation Study (BIS) de SAF, orientado a analizar casos concretos de implementación y producción de SAF en el país. Este avance corresponde a una etapa posterior al estudio de factibilidad, pero no implica que la producción comercial a gran escala se encuentre actualmente implementada.

El escenario de Lecocq (2025) contempla un despliegue progresivo hasta alcanzar 29 instalaciones en 2050. Este resultado se construye a partir de capacidades medias por tecnología y de supuestos sobre maduración tecnológica, reducción de costos de energía renovable e hidrógeno y disponibilidad de biomasa. El informe considera un único desarrollo

MtJ y advierte una elevada incertidumbre para las plantas AtJ. Por ello, las 29 instalaciones representan una configuración de referencia bajo esos supuestos, no un catastro de proyectos confirmados ni la demostración de que todas las plantas sean financieramente viables.

***Tabla 3.4**: Escenario de despliegue de plantas de SAF en Chile.*

Año	Coprocesado	PtL FT	Gasificación	MtJ	AtJ	Total
2030	1	0	0	0	0	1
2035	1	4	3	1	1	10
2040	1	7	5	1	2	16
2045	1	10	7	1	3	22
2050	1	15	9	1	3	29

Fuente: Elaboración propia con base en Lecocq (2025, p. 118, tabla 25).

Desde la perspectiva de la seguridad energética, el desarrollo del SAF también presenta una oportunidad para diversificar el aasibastecimiento de combustible de aviación en Chile. El Estudio de Factibilidad de la OACI señala que aproximadamente el 51% del queroseno de aviación utilizado en el país era importado, por lo que identifica la producción nacional de SAF como una alternativa potencial para disminuir esta dependencia (Lecocq, 2025). Sin embargo, este beneficio no se obtiene automáticamente mediante la incorporación de SAF, especialmente si el combustible es importado. Su contribución dependería del desarrollo efectivo de producción nacional, de la disponibilidad de recursos y de las condiciones de suministro. Por lo tanto, aunque existe un potencial estratégico, la evidencia revisada no permite cuantificar su efecto sobre la seguridad energética del país.

De esta forma, el posicionamiento actual del SAF en Chile puede caracterizarse a partir de la existencia de materias primas potenciales, rutas tecnológicas identificadas, infraestructura energética susceptible de adaptación y estudios de factibilidad e implementación en desarrollo. Al mismo tiempo, una parte importante de la capacidad productiva e infraestructura considerada para el largo plazo corresponde todavía a escenarios proyectados, por lo que su materialización dependerá de la evolución de las condiciones técnicas, productivas y de infraestructura analizadas en las etapas posteriores de la investigación.

El desarrollo del SAF en Chile involucra a actores públicos y privados vinculados con la aviación, los combustibles y las materias primas, cuya interacción contribuye a la conformación de la cadena de valor y del ecosistema nacional de SAF. La *Figura 3.1* presenta una representación de este ecosistema.



Figura 3.*1. Ecosistema Nacional de los SAF. Fuente: Programa Vuelo Limpio (s. f.)*

3.2 Evaluación ambiental, económica y social del SAF en Chile

La evaluación del SAF se aborda mediante las dimensiones ambiental, económica y social propuestas por el enfoque Triple Bottom Line, incorporando los antecedentes de Evaluación de Ciclo de Vida (ECV) y economía circular establecidos en el marco teórico.

3.2.1 Dimensión ambiental

La principal contribución ambiental asociada al SAF corresponde a la posibilidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero respecto del combustible de aviación convencional. Sin embargo, esta reducción no constituye una característica automática de todo combustible denominado SAF, ya que su magnitud depende de la materia prima utilizada, la ruta tecnológica, la energía empleada durante la producción y las distintas etapas de la cadena de suministro. Por esta razón, la evaluación debe considerar el ciclo de vida completo del combustible.

La metodología de ciclo de vida utilizada por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) considera las emisiones asociadas a la obtención de la materia prima, su cosecha, recolección y recuperación, procesamiento y extracción, transporte hacia las instalaciones de producción, conversión a combustible, transporte y distribución y, finalmente, combustión en la aeronave. Asimismo, el valor de emisiones de ciclo de vida puede incorporar las emisiones asociadas al cambio indirecto de uso de suelo (ILUC) y, en el caso de determinados combustibles producidos a partir de residuos sólidos municipales, créditos asociados al reciclaje y a la evitación de disposición en rellenos sanitarios (OACI, 2025a).

De esta manera, el desempeño ambiental del SAF depende de la cadena completa y no únicamente de las emisiones generadas durante su combustión. Esta consideración resulta especialmente relevante para Chile debido a la diversidad de materias primas identificadas en el análisis de posicionamiento. Por ejemplo, los aceites usados de cocina y los residuos agrícolas, como la paja de trigo, provienen de actividades previas y su aprovechamiento para producir SAF requiere contabilizar las emisiones asociadas a su recolección, transporte, acondicionamiento y conversión. En cambio, cuando se emplean cultivos producidos específicamente como materia prima, deben considerarse también los impactos asociados a su producción agrícola y los posibles efectos del cambio de uso del suelo. Estas diferencias influyen en las emisiones de ciclo de vida y deben evaluarse de acuerdo con las

características de cada alternativa (OACI, 2025a).

Dentro del marco CORSIA, los residuos, residuos secundarios y subproductos pueden presentar un tratamiento favorable respecto de las emisiones asociadas al cambio indirecto de uso de suelo, aunque el resultado final continúa dependiendo de las demás etapas de la cadena de producción y de los criterios de sostenibilidad aplicables (OACI, 2025a).

Por ello, la selección de una materia prima no puede realizarse únicamente sobre la base de su disponibilidad, sino que debe considerar su desempeño ambiental durante todo el ciclo de vida.

En este contexto, los aceites usados de cocina (UCO) representan una alternativa de interés para Chile. Bajo el escenario optimista que supone recolectar el 75% del potencial proyectado de UCO para 2035 y utilizar una configuración HEFA orientada a maximizar la producción de SAF, el estudio de Nogueira et al. (2026) estima una producción cercana a 99 millones de litros anuales, equivalente aproximadamente al 4,1% de la demanda nacional de combustible de aviación considerada para ese año. Para estimar su contribución ambiental, el estudio considera la sustitución de ese volumen de combustible convencional y utiliza factores de emisiones de ciclo de vida de referencia de CORSIA de 89 g CO_2e/MJ para Jet-A y 13,9 g CO_2e/MJ para SAF producido mediante HEFA a partir de UCO, junto con contenidos energéticos de 34,7 y 33,5 MJ/L, respectivamente. Bajo estos supuestos, se obtiene una reducción potencial aproximada de 260 mil toneladas de CO_2 equivalente (Nogueira et al., 2026, p. 107, nota 55). Esta estimación corresponde a un escenario proyectado y no a reducciones de emisiones actualmente verificadas en Chile.

Estos antecedentes muestran que la valorización de UCO puede contribuir simultáneamente a la reducción de emisiones y al aprovechamiento de un residuo cuya recuperación actual es limitada.

El caso del UCO también permite observar la relación entre SAF y economía circular. En lugar de considerar el aceite usado exclusivamente como un residuo, su incorporación a una cadena de producción energética permite recuperar parte de su valor mediante una nueva aplicación. Esta lógica también puede extenderse a otras materias primas residuales identificadas en Chile, como residuos forestales, residuos agrícolas y residuos sólidos municipales. No obstante, la valorización de estos recursos requiere sistemas adecuados de

recolección, clasificación, transporte y procesamiento, por lo que su beneficio ambiental depende de que la cadena de recuperación sea técnicamente viable y de que las emisiones asociadas a estas etapas sean consideradas en la evaluación de ciclo de vida.

La utilización de residuos tampoco elimina automáticamente todos los impactos ambientales asociados a su transformación. El transporte de materias primas, el consumo de energía, los procesos de acondicionamiento y conversión y la distribución del combustible forman parte de la cadena que debe ser considerada en la evaluación. En el caso de los residuos y materias primas que requieren acondicionamiento previo, incluso las emisiones asociadas a dicho procesamiento deben incorporarse al cálculo del desempeño de ciclo de vida (OACI, 2025a). En consecuencia, una alternativa que utilice un residuo puede presentar ventajas ambientales frente a una materia prima convencional, pero su desempeño debe determinarse mediante una evaluación específica de ciclo de vida y no únicamente por la clasificación de la materia prima como residuo.

En el caso chileno, esta consideración adquiere importancia al comparar las distintas rutas tecnológicas. Las diferencias en materia prima, proceso de conversión y requerimientos energéticos pueden modificar significativamente las emisiones de ciclo de vida obtenidas. Por ello, el desarrollo de una industria nacional debería considerar el desempeño ambiental de cada combinación entre materia prima y tecnología, en lugar de evaluar únicamente el volumen potencial de SAF que podría producirse.

Es importante señalar que esta memoria no realiza cálculos propios de emisiones para cada combinación de materia prima y tecnología de producción de SAF. Por lo tanto, para comparar sus resultados ambientales en Chile, sería necesario desarrollar estudios específicos que consideren las condiciones de cada alternativa.

3.2.2 Dimensión económica

Desde la dimensión económica, uno de los principales desafíos del SAF corresponde a la diferencia entre sus costos de producción y los del combustible de aviación convencional. Esta diferencia se relaciona con el costo de las materias primas, la tecnología utilizada, la escala de producción, el nivel de madurez de los procesos, el acceso a infraestructura y las necesidades de inversión.

El estudio del MIT estima para Chile valores de aproximadamente US$1,68 por litro para SAF obtenido mediante etanol de maíz y US$2,53 por litro mediante Fischer-Tropsch a partir de residuos forestales, bajo supuestos de plantas maduras. Estos valores corresponden a las alternativas evaluadas y no representan un rango general para todas las rutas tecnológicas. Asimismo, el estudio estima una inversión acumulada de aproximadamente US$27.000 millones para construir nuevas plantas de SAF en Chile entre 2025 y 2050, bajo el escenario A3*. Este corresponde al escenario de mayor incorporación de SAF analizado por el MIT, que supone alcanzar una participación del 65% de SAF en el consumo de combustible de aviación para 2050. El asterisco indica que, para Chile se incorpora un supuesto adicional de que el SAF producido mediante Power-to-Liquid (PtL) represente el 10% del consumo de combustible de aviación en ese año, dentro del 65% proyectado. Los costos señalados corresponden a estimaciones de producción y no a precios comerciales observados, mientras que la inversión proyectada no representa recursos comprometidos (Paltsev et al., 2024).

Como referencia internacional de mercado, la OACI reportó que durante 2024 el precio unitario del SAF se situó aproximadamente entre US$1,8 y US$2,3 por litro, mientras que el combustible de aviación convencional registró un precio promedio cercano a US$0,64 por litro, lo que sitúa al SAF en un orden de magnitud aproximado de tres veces el precio del combustible convencional (OACI, 2025c). Estos valores corresponden a referencias internacionales de precio y no son directamente equivalentes a los costos de producción modelados para Chile, aunque permiten dimensionar la magnitud de la brecha económica que actualmente caracteriza al mercado del SAF.

La *Figura 3.2* presenta gráficamente esta diferencia de precios.

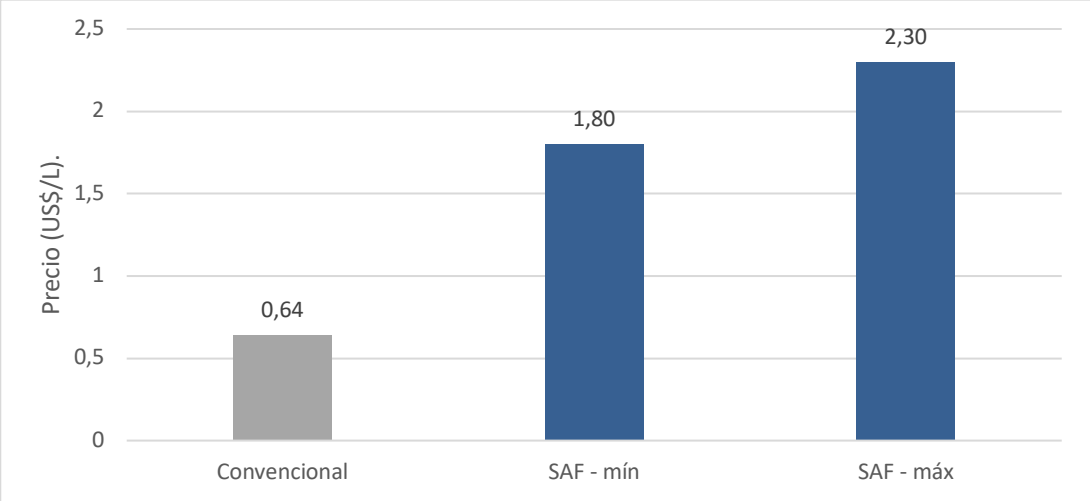


Figura 3.2. *Comparación de precios internacionales del combustible convencional y SAF en 2024.*

Fuente: Elaboración propia con base en OACI (2025c, figura 39)

Nota. Los valores mínimo y máximo del SAF representan el rango de precios reportado para 2024, mientras que el valor del combustible convencional corresponde a su precio promedio.

La diferencia de costos también puede afectar al sistema aeronáutico en su conjunto. El aumento del precio del combustible puede incrementar los costos operacionales de las aerolíneas y, dependiendo de las condiciones bajo las cuales se implemente el SAF, generar efectos sobre la demanda de transporte aéreo. El estudio del MIT señala que, sin estrategias destinadas a gestionar los aumentos de precios, los mayores requerimientos de SAF podrían afectar la demanda de aviación (Paltsev et al., 2024).

Por esta razón, la competitividad económica del SAF no depende únicamente de reducir su costo de producción, sino también de las condiciones que permitan incorporarlo progresivamente sin generar efectos desproporcionados sobre la operación del transporte aéreo.

La escala constituye otro factor relevante. La producción de SAF requiere inversiones en instalaciones de conversión, almacenamiento y distribución y, dependiendo de la ruta, infraestructura asociada al suministro de materias primas, hidrógeno o energía renovable. El estudio de factibilidad desarrollado para Chile proyecta una expansión progresiva de la producción, desde 75 mil m³ anuales de SAF mediante coprocesamiento en 2030 hasta 1,825

millones de m³ en 2050, equivalentes al 50 % de la demanda proyectada para ese año (Lecocq, 2025).

Para interpretar estas proyecciones, es necesario considerar los principales supuestos del modelo de simulación presentado en el Estudio de Factibilidad de la OACI para Chile:

1. **Demanda futura:** se proyecta un crecimiento del consumo de combustible de aviación en Chile similar al promedio internacional, utilizando antecedentes de Vuelo Limpio y el BID.
2. **Capacidad productiva:** se estima cuánto SAF podría producir cada instalación según la tecnología utilizada, tomando como referencia proyectos internacionales. Para el coprocesamiento, se utiliza como referencia de la capacidad potencial de ENAP, la disponibilidad de aceites usados de cocina y la limitación del 5% considerada para esta tecnología.
3. **Implementación inicial:** se supone que el coprocesamiento sería la primera tecnología en implementarse, mediante infraestructura de refinación existente de ENAP.
4. **Desarrollo tecnológico:** se proyecta un aumento gradual de plantas Power-to-Liquid Fischer-Tropsch y de gasificación. En el primer caso, depende de la madurez tecnológica y de la reducción de los costos de las energías renovables y del hidrogeno. En el segundo, depende de la disponibilidad de residuos aprovechables, especialmente forestales, agrícolas y municipales.
5. **Otras rutas de producción:** se contempla únicamente el proyecto Haru Oni para Methanol-to-Jet y un máximo de tres plantas Alcohol-to-Jet, reconociendo una elevada incertidumbre respecto de la viabilidad de estas últimas.

Estas cifras corresponden a un escenario de desarrollo y no a infraestructura actualmente instalada, por lo que evidencian la magnitud de las inversiones y de la coordinación necesarias para transformar el potencial identificado en capacidad productiva efectiva.

Como se presenta en la *Tabla 3.3*, el escenario proyectado para 2050 considera distintas rutas tecnológicas: 75 mil m³ de coprocesamiento, 750 mil m³ mediante Power-to-Liquid Fischer-Tropsch, 675 mil m³ mediante gasificación, 100 mil m³ mediante Methanol-to-Jet y 225 mil m³ mediante Alcohol-to-Jet. La diversificación permite distribuir la producción

entre distintas materias primas y tecnologías, pero también implica requerimientos diferenciados de infraestructura, capital y madurez tecnológica (Lecocq, 2025).

La infraestructura existente puede reducir parte de estas barreras en determinadas rutas. El coprocesamiento presenta una condición particular debido a que puede utilizar infraestructura de refinación existente, disminuyendo la necesidad de construir una cadena completamente nueva. En Chile, esta alternativa ha sido considerada para las primeras etapas de desarrollo del SAF; sin embargo, su capacidad efectiva dependerá de la disponibilidad de materias primas adecuadas y de las condiciones técnicas y económicas de las instalaciones involucradas (Lecocq, 2025).

Las estimaciones de coprocesamiento dependen del alcance y de los supuestos utilizados. Mientras ACT-SAF considera 75 millones de litros anuales de SAF mediante coprocesamiento para 2030, el estudio UCO utiliza la Refinería Aconcagua, operada por ENAP[1], como referencia y estima un máximo aproximado de 26 millones de litros anuales de SAF bajo sus supuestos de capacidad y operación hacia 2035. Este último estudio advierte que dicha estimación representa un potencial teórico que requiere una evaluación específica de las condiciones operacionales de la refinería. Por lo tanto, ambos resultados no son directamente comparables y evidencian la importancia de explicitar los supuestos y restricciones al evaluar la capacidad productiva nacional (Lecocq, 2025; Nogueira et al., 2026).

En consecuencia, la viabilidad económica del SAF en Chile depende de la interacción entre disponibilidad de recursos, escala productiva, tecnología e infraestructura. La existencia de materias primas potencialmente aprovechables constituye una condición necesaria, pero no suficiente para asegurar una industria competitiva. La transformación de ese potencial en producción efectiva requiere inversiones, reducción de costos, infraestructura adecuada y condiciones de mercado que permitan disminuir progresivamente el diferencial respecto del combustible convencional.

[1] Empresa Nacional del Petróleo (ENAP), empresa estatal chilena dedicada a actividades de refinación y abastecimiento de combustibles.

3.2.3 Dimensión social

La dimensión social del SAF se relaciona principalmente con el desarrollo de nuevas capacidades, la generación de actividades productivas asociadas a la cadena de valor y el fortalecimiento de capacidades técnicas y profesionales vinculadas con la transición energética de la aviación.

La Hoja de Ruta SAF 2050 incorpora la formación de capacidades como uno de sus ejes de acción y plantea medidas orientadas a identificar las necesidades de capital humano, fortalecer el sector académico, crear perfiles laborales específicos y desarrollar programas de capacitación para distintos niveles y funciones dentro de la cadena de valor del SAF (Ministerio de Energía et al., 2024).

Esto evidencia que el desarrollo de esta industria requiere no solo infraestructura física, sino también capacidades técnicas y profesionales vinculadas con actividades de producción, certificación, logística, investigación, operación y gestión.

Esta necesidad adquiere relevancia debido a que la cadena de valor del SAF involucra actores provenientes de distintos sectores. Dependiendo de la ruta utilizada, pueden participar productores y recolectores de materias primas, empresas forestales y agrícolas, gestores de residuos, refinerías, productores de hidrógeno y energía renovable, empresas de transporte, operadores aeroportuarios, aerolíneas, organismos públicos y entidades de certificación. El desarrollo del SAF puede, por lo tanto, generar nuevos vínculos entre actividades que actualmente operan en cadenas productivas diferenciadas.

El aprovechamiento de residuos también puede generar oportunidades de desarrollo territorial cuando las actividades de recolección, acondicionamiento y procesamiento se localizan próximas a las zonas donde se encuentran disponibles las materias primas. Esto resulta especialmente relevante para recursos forestales, agrícolas y urbanos, cuya disponibilidad presenta una distribución territorial. Sin embargo, estas oportunidades no deben interpretarse como beneficios sociales automáticos, ya que dependen de la capacidad de establecer cadenas de suministro formales, infraestructura adecuada y mecanismos de participación y coordinación entre los actores involucrados.

En materia de empleo, el desarrollo de una industria de SAF podría generar nuevas necesidades de trabajadores especializados y actividades asociadas a la cadena de suministro.

No obstante, las fuentes revisadas en esta memoria no permiten establecer una estimación suficientemente respaldada de los empleos directos e indirectos que podría generar una futura industria nacional. Por ello, este efecto debe considerarse como un potencial asociado al desarrollo de nuevas actividades productivas y capacidades, y no como un resultado cuantificado.

La dimensión social también comprende la capacidad del país para desarrollar y retener conocimiento especializado. La Hoja de Ruta contempla acciones de cooperación internacional y formación de capital humano, junto con el fortalecimiento del sector académico y la generación progresiva de perfiles laborales específicos para la industria (Ministerio de Energía et al., 2024).

De esta manera, el desarrollo de capacidades nacionales constituye una condición relevante para que la incorporación del SAF no se limite a la adquisición de combustible, sino que pueda generar capacidades vinculadas con su producción, certificación, investigación y operación.

La articulación entre actores descrita en la sección 2.1.4 también cuenta con antecedentes cuantitativos. Según la Junta de Aeronáutica Civil (2024), el taller ACT-SAF, realizado en noviembre de 2024, reunió a más de 130 profesionales de instituciones vinculadas con la cadena de valor del SAF. Asimismo, el Acuerdo Público-Privado SAF 2024 contó con la participación de 48 empresas y organizaciones. Estas cifras permiten identificar avances en la coordinación entre sectores, aunque no demuestran por sí solas la generación de empleo ni el desarrollo efectivo de capacidades especializadas.

Para evaluar estos últimos aspectos, se proponen cuatro indicadores: (i) número de programas de formación especializados en SAF; (ii) cantidad anual de profesionales y técnicos capacitados; (iii) número de proyectos de investigación y desarrollo vinculados al SAF con participación de instituciones nacionales; y (iv) empleos directos generados por proyectos de producción efectivamente implementados. Estos indicadores permitirían distinguir entre las iniciativas de preparación y los resultados asociados al desarrollo de una industria nacional. Sin embargo, las fuentes revisadas no permiten establecer una línea de base nacional suficientemente respaldada para cuantificarlos, por lo que se plantean como criterios de seguimiento futuro.

3.2.4 Integración de las dimensiones mediante Triple Bottom Line

El análisis de las dimensiones ambiental, económica y social permite observar que los efectos asociados al desarrollo del SAF se encuentran interrelacionados. Desde la perspectiva ambiental, determinadas materias primas residuales pueden contribuir a reducir emisiones de gases de efecto invernadero y, al mismo tiempo, mejorar la valorización de residuos. Desde la dimensión económica, estas oportunidades requieren inversiones, infraestructura, disponibilidad de materias primas y condiciones que permitan reducir las diferencias de costos respecto del combustible convencional. Desde la dimensión social, la consolidación de la cadena de valor requiere capital humano, capacidades técnicas y coordinación entre los distintos actores involucrados.

Esta relación permite aplicar el enfoque Triple Bottom Line de manera integrada, evitando evaluar el SAF exclusivamente por su capacidad de reducir emisiones. Una alternativa puede presentar un desempeño ambiental favorable, pero enfrentar restricciones asociadas a la disponibilidad de materia prima o a sus costos de producción. Del mismo modo, una ruta con potencial económico puede requerir mayores avances tecnológicos o capacidades que todavía no se encuentran disponibles a escala nacional. Por ello, la evaluación conjunta permite identificar tanto las oportunidades como las condiciones necesarias para que los beneficios ambientales, económicos y sociales puedan materializarse.

En el caso chileno, la evidencia disponible muestra diferencias importantes entre las alternativas según la materia prima y la tecnología utilizada. El UCO constituye un ejemplo de una alternativa que combina valorización de residuos, reducción potencial de emisiones y tecnologías de producción consideradas maduras, aunque su contribución está limitada por la cantidad efectivamente recuperable (Nogueira et al., 2026). Por otra parte, las rutas basadas en residuos forestales, residuos agrícolas, residuos sólidos municipales y recursos asociados al hidrógeno renovable presentan posibilidades de desarrollo a mayor escala, pero requieren distintos niveles de inversión, infraestructura y madurez tecnológica.

En este sentido, el enfoque Triple Bottom Line permite interpretar el desarrollo del SAF como un proceso en el que los resultados de una dimensión se encuentran condicionados por factores pertenecientes a las otras dos. La reducción de emisiones depende de las características de la cadena productiva; la viabilidad económica depende de los recursos, tecnologías e infraestructura disponibles; y los beneficios sociales dependen de la capacidad

de desarrollar capital humano y una cadena de valor articulada.

Esta interdependencia permite establecer una base para el análisis posterior de los instrumentos regulatorios y económicos que pueden favorecer o limitar el desarrollo del SAF en Chile.

3.3 Análisis de instrumentos regulatorios y económicos para el desarrollo del SAF en Chile

A partir de las condiciones productivas, económicas y tecnológicas analizadas anteriormente, se examinan los instrumentos regulatorios y económicos que pueden incidir en el desarrollo del SAF en Chile. El análisis se centra en la función que estos mecanismos pueden cumplir frente a las principales barreras identificadas, utilizando experiencias internacionales como referencia para evaluar sus posibles implicancias en el contexto nacional.

3.3.1 Instrumentos regulatorios

Una de las principales funciones de la regulación en el desarrollo del SAF corresponde a generar condiciones de mercado que reduzcan la incertidumbre asociada a las inversiones de largo plazo. En este sentido, un instrumento particularmente relevante corresponde al establecimiento de obligaciones progresivas de incorporación de SAF. A diferencia de una meta meramente indicativa, un mandato establece una obligación de incorporación o suministro de SAF, que puede entregar mayor previsibilidad a los productores y facilitar la planificación de nuevas capacidades de producción.

El Estudio de Factibilidad desarrollado para Chile señala que una eventual trayectoria de incorporación debería considerar la capacidad futura de producción y suministro del país y que los porcentajes mínimos podrían incorporar mecanismos de flexibilidad para adaptarse a dichas capacidades (Lecocq, 2025).

Esta condición resulta especialmente relevante al relacionarla con las proyecciones analizadas en la sección 3.1. El aumento de la participación del SAF requiere que la oferta se desarrolle de manera paralela, por lo que una obligación de incorporación no debería analizarse únicamente desde la demanda. Su efectividad dependería de la existencia de producción nacional, posibilidades de importación, infraestructura de distribución y capacidad de cumplimiento de los actores involucrados.

Las experiencias internacionales permiten observar cómo se concretan estas obligaciones. En la Unión Europea, el reglamento ReFuelEU Aviation establece porcentajes mínimos de SAF en el combustible suministrado en los aeropuertos de la Unión: 2 % en 2025, 6 % en 2030, 20 % en 2035 y 70 % en 2050 (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2023). Por otro lado, el Reino Unido estableció mediante el SAF Mandate una trayectoria

de 2 % en 2025, 10 % en 2030 y 22 % en 2040, acompañada de un sistema de certificados comercializables y mecanismos de flexibilidad para el cumplimiento de las obligaciones (Department for Transport, 2024).

Estas experiencias muestran que los mandatos pueden establecer una trayectoria gradual y previsible para la incorporación de SAF, aunque sus porcentajes no podrían trasladarse directamente a Chile sin evaluar previamente las condiciones nacionales de suministro, infraestructura y costos. En el contexto chileno, una alternativa sería establecer obligaciones progresivas sujetas a revisiones periódicas de la disponibilidad efectiva del combustible y de la capacidad de cumplimiento de los actores involucrados. Esta medida tendría que complementarse con incentivos económicos para favorecer el desarrollo de la oferta, los cuales se analizan en la sección 3.3.2.

Por otra parte, la regulación no debe limitarse a establecer porcentajes de incorporación. Para que el SAF pueda ingresar efectivamente a la cadena de suministro, deben existir condiciones técnicas y de sostenibilidad que permitan determinar qué combustibles y materias primas cumplen los requisitos establecidos. En este ámbito, los criterios de sostenibilidad, certificación y cálculo de emisiones de ciclo de vida asociados a CORSIA constituyen una referencia técnica para el desarrollo de una futura regulación nacional compatible con los mercados internacionales (OACI, 2025a, 2025b).

Por lo tanto, el principal aporte de los instrumentos regulatorios no consiste únicamente en establecer una obligación de consumo, sino en reducir la incertidumbre del mercado y establecer reglas que permitan coordinar el desarrollo de la oferta con la demanda. En el caso chileno, esto implica que la trayectoria regulatoria debería considerar simultáneamente la capacidad productiva proyectada, la disponibilidad de materias primas, los costos de producción y las condiciones de infraestructura identificadas anteriormente. Estas condiciones regulatorias se relacionan, a su vez, con las barreras económicas analizadas a continuación.

3.3.2 Instrumentos económicos y mecanismos de mercado

Las condiciones anteriores muestran que una señal regulatoria, por sí sola, no necesariamente permite superar las barreras económicas que enfrenta el desarrollo del SAF. Por ello, resulta necesario analizar instrumentos capaces de intervenir sobre los costos, el riesgo de inversión

y el financiamiento de los proyectos.

El Estudio de Factibilidad de OACI identifica para Chile distintas alternativas, entre ellas subvenciones y financiamiento público, beneficios fiscales, primas de precio, incentivos regulatorios, apoyo a infraestructura y mecanismos destinados a estimular la demanda. El estudio señala además que estos instrumentos deberían formar parte de un marco de medidas fiscales y económicas diseñado para facilitar una implementación progresiva del SAF, aunque no establece montos de subvención, tasas de beneficio fiscal ni primas de precio específicos para su aplicación en Chile (Lecocq, 2025).

La función de estos mecanismos no es equivalente. Un incentivo a la inversión o mecanismo de financiamiento puede reducir la barrera asociada al capital inicial requerido para desarrollar nuevas instalaciones. Un incentivo tributario o apoyo al precio puede disminuir el costo efectivo de producción o consumo, mientras que los mecanismos destinados a generar demanda pueden reducir la incertidumbre comercial que enfrenta un proyecto antes de alcanzar una escala suficiente.

Esta distinción permite relacionar los instrumentos con las condiciones económicas identificadas en la sección 3.2. Si una de las principales restricciones corresponde al elevado capital requerido para desarrollar nueva capacidad, el financiamiento y los incentivos a la inversión actúan directamente sobre esa barrera. Si la dificultad se concentra en la diferencia entre el precio del SAF y el combustible convencional, adquieren mayor relevancia los mecanismos destinados a reducir dicho diferencial.

Estados Unidos presenta un ejemplo de intervención económica mediante el Clean Fuel Production Credit, establecido bajo la sección 45Z. El mecanismo contempla un crédito tributario para la producción doméstica de combustibles de transporte limpios, incluyendo SAF, y se aplica a combustibles producidos y vendidos entre enero de 2025 y diciembre de 2029, de acuerdo con la legislación vigente (IRS, 2026).

En términos prácticos, el mecanismo permite que un productor elegible obtenga un crédito tributario calculado a partir del volumen de combustible producido y vendido, una tasa aplicable por unidad y su factor de emisiones. De esta manera, el incentivo puede mejorar las condiciones económicas de producción sin establecer una obligación de compra para las aerolíneas (IRS, 2026).

La experiencia estadounidense permite observar una diferencia respecto de los mandatos analizados anteriormente: mientras un mandato actúa principalmente generando una obligación de incorporación o suministro de SAF que contribuye a generar demanda, un incentivo tributario puede intervenir directamente sobre las condiciones económicas de producción. Por ello, ambos instrumentos pueden responder a barreras distintas y, potencialmente, complementarse.

En el contexto chileno, esta diferenciación adquiere importancia debido a que las proyecciones de producción analizadas en 3.1 requieren el desarrollo progresivo de nuevas capacidades. Los instrumentos financieros pueden contribuir a reducir las barreras iniciales asociadas a la inversión, mientras que los mecanismos vinculados al precio pueden actuar sobre la competitividad del producto una vez que existe capacidad de producción.

Asimismo, la Hoja de Ruta SAF 2050 contempla el análisis de mecanismos como créditos fiscales, subastas y sistemas book and claim como alternativas para el desarrollo del mercado (Ministerio de Energía et al., 2024). Estos mecanismos presentan funciones diferentes: mientras los incentivos económicos pueden afectar las condiciones de producción o consumo, los sistemas asociados a atributos ambientales pueden contribuir a otorgar valor económico a las reducciones de emisiones.

Por lo tanto, los instrumentos económicos no deberían evaluarse únicamente según su capacidad para reducir el precio del SAF. También es necesario considerar si permiten disminuir el riesgo de inversión, facilitar el desarrollo tecnológico, estimular la oferta y reconocer las diferencias de desempeño ambiental entre las alternativas de producción.

3.3.3 Análisis comparativo y pertinencia para Chile

Las experiencias revisadas permiten distinguir tres funciones principales de los instrumentos utilizados internacionalmente: generar demanda, reducir las barreras económicas de producción y otorgar valor a los atributos ambientales del combustible. Los mecanismos regulatorios analizados actúan principalmente sobre la demanda y la previsibilidad del mercado, mientras que los instrumentos económicos pueden intervenir sobre los costos y el riesgo asociado a la producción. Los mecanismos vinculados a atributos ambientales, por su parte, introducen una dimensión económica asociada al desempeño ambiental del combustible.

Esta diferenciación resulta relevante al considerar conjuntamente los resultados de las secciones 3.1 y 3.2. La existencia de materias primas, rutas tecnológicas e infraestructura potencial no elimina las necesidades de inversión identificadas, mientras que las ventajas ambientales y económicas del SAF dependen de las características de cada ruta de producción. Por lo tanto, las condiciones de oferta, demanda, inversión y sostenibilidad deben ser consideradas de manera conjunta al evaluar los instrumentos.

En este contexto, un mandato progresivo podría contribuir principalmente a reducir la incertidumbre de demanda. Sin embargo, su trayectoria debería guardar relación con el crecimiento de la oferta, tal como plantea el Estudio de Factibilidad de OACI para Chile. El estudio contempla explícitamente que los porcentajes mínimos puedan incorporar mecanismos de flexibilidad vinculados con la capacidad de producción y suministro, y que los objetivos de uso sean acompañados por incentivos destinados a mitigar la diferencia de precios respecto de los combustibles convencionales (Lecocq, 2025).

Los instrumentos económicos y financieros cumplirían una función complementaria. El financiamiento y los incentivos a la inversión podrían facilitar la construcción de capacidad durante las primeras etapas, mientras que los mecanismos asociados al precio podrían reducir la diferencia entre el SAF y el combustible convencional. Esta combinación permitiría actuar simultáneamente sobre el riesgo de oferta y sobre las condiciones económicas que afectan su competitividad.

Por otra parte, los mecanismos asociados a atributos ambientales pueden contribuir a diferenciar combustibles según su desempeño de ciclo de vida. Esto resulta pertinente para Chile debido a la diversidad de materias primas y rutas tecnológicas identificadas en 3.1, cuyos requerimientos productivos y resultados ambientales no son necesariamente equivalentes.

La comparación internacional también muestra que los instrumentos pueden incorporar objetivos tecnológicos específicos. La Unión Europea establece obligaciones diferenciadas para combustibles sintéticos y el Reino Unido incorpora una obligación específica para Power-to-Liquid. Estas experiencias muestran que los instrumentos regulatorios pueden utilizarse no solo para aumentar el consumo agregado de SAF, sino también para orientar parte de la demanda hacia determinadas alternativas tecnológicas. Para Chile, una

diferenciación de este tipo tendría que considerar la disponibilidad de recursos, los requerimientos energéticos, la madurez tecnológica y el desempeño ambiental de cada ruta.

Brasil presenta otra experiencia de interés para la comparación, particularmente por su contexto latinoamericano y su experiencia previa en biocombustibles. La Ley N.º 14.993 de 2024, que creó el Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), estableció obligaciones progresivas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero para las operaciones aéreas domésticas, comenzando con un 1 % en 2027 y alcanzando un 10 % en 2037. A diferencia de un mandato expresado exclusivamente como porcentaje de SAF, este mecanismo vincula el cumplimiento con la reducción de emisiones asociada al combustible utilizado, considerando su desempeño ambiental (Brasil, 2024). Posteriormente, el Decreto N.º 13.094 de 2026 desarrolló aspectos de implementación del programa y las responsabilidades institucionales asociadas a su cumplimiento (Brasil, 2026). Esta experiencia resulta pertinente para Chile porque muestra una alternativa regulatoria que vincula la incorporación de SAF con su desempeño ambiental, aunque las diferencias entre ambos países en disponibilidad de materias primas, capacidad productiva y experiencia en biocombustibles deben ser consideradas al realizar la comparación.

En consecuencia, la evidencia revisada no permite considerar un único instrumento como suficiente para abordar las distintas barreras del SAF en Chile. La regulación puede contribuir a generar demanda y establecer condiciones técnicas; los instrumentos financieros y económicos pueden reducir las barreras de inversión y costos; y los mecanismos asociados al desempeño ambiental pueden contribuir a reconocer las diferencias entre las alternativas de producción.

Por ello, el desarrollo de instrumentos para Chile requiere una articulación progresiva entre oferta, demanda, inversión y sostenibilidad, de manera que las señales regulatorias sean coherentes con la capacidad efectiva de suministro y con las condiciones económicas y tecnológicas identificadas previamente. Bajo esta perspectiva, los instrumentos regulatorios y económicos constituyen mecanismos complementarios para transformar el potencial productivo identificado en 3.1 en condiciones efectivas de desarrollo del mercado.

3.4 Análisis del proceso de adopción del SAF en Chile

La adopción del SAF en Chile se analiza mediante la **Teoría de Difusión de Innovaciones de Rogers**, considerando los cinco atributos de la innovación establecidos en el marco teórico: ventaja relativa, compatibilidad, complejidad, posibilidad de prueba y observabilidad (Rogers, 2003). Estos atributos se aplican a la evidencia disponible sobre el desarrollo del SAF en Chile, con el propósito de identificar las condiciones que favorecen o dificultan su incorporación.

Los atributos se utilizan para interpretar condiciones de producción, suministro y uso de SAF, distinguiendo las decisiones de los actores involucrados. El análisis no mide una tasa de difusión ni determina una categoría nacional de adoptantes.

3.4.1 Atributos de la innovación

Ventaja relativa

Para el caso de la ventaja relativa, la adopción del SAF puede analizarse a partir de los beneficios que presenta frente al combustible de aviación convencional. Su principal ventaja se relaciona con su potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero durante el ciclo de vida del combustible, aunque la magnitud de esta reducción depende de la materia prima utilizada, la ruta tecnológica y las condiciones de producción. Como se analizó en la sección 3.2, esta característica constituye uno de los principales aportes ambientales asociados al SAF.

Sin embargo, esta ventaja ambiental se enfrenta a condiciones que pueden limitar su atractivo para los potenciales adoptantes, principalmente su mayor costo y la disponibilidad todavía limitada de producción. LATAM Airlines Group identifica el precio y la volatilidad del SAF, junto con su disponibilidad limitada, como factores que pueden incrementar los costos operacionales y afectar las condiciones de competitividad de las aerolíneas. Asimismo, la compañía señala que mantiene conversaciones con proveedores actuales y potenciales para asegurar condiciones competitivas de suministro y evaluar futuras oportunidades de incorporación del SAF (LATAM Airlines Group, 2025).

Por lo tanto, la ventaja relativa del SAF en Chile no se manifiesta únicamente como un beneficio económico inmediato, sino principalmente como un beneficio ambiental asociado

a la reducción de emisiones de la aviación. La materialización de esta ventaja dependerá, a su vez, de la capacidad de desarrollar una oferta suficiente y competitiva.

Compatibilidad

La compatibilidad del SAF presenta una condición favorable debido a su carácter drop-in. Los SAF que cumplen con las especificaciones técnicas y de certificación correspondientes pueden incorporarse a aeronaves y sistemas compatibles con el combustible convencional sin requerir el reemplazo completo de la tecnología aeronáutica existente. Esta característica reduce una de las posibles barreras técnicas para su incorporación y permite aprovechar parte de la infraestructura disponible (Lecocq, 2025).

No obstante, la compatibilidad técnica no garantiza por sí sola su incorporación efectiva al sistema aeronáutico nacional. También es necesario disponer de condiciones adecuadas para su almacenamiento, distribución y suministro en los aeropuertos. Esta dimensión ha comenzado a ser abordada en Chile mediante el Business Implementation Study (BIS), desarrollado durante 2026, en el cual se han analizado requerimientos asociados a logística de combustibles, almacenamiento, distribución aeroportuaria, comercialización y suministro a las aeronaves (JAC, 2026).

Por ello, la compatibilidad del SAF puede analizarse tanto desde su integración técnica al sistema aeronáutico como desde las condiciones operativas necesarias para su utilización.

Complejidad

En el caso del SAF, la complejidad de su adopción no se relaciona principalmente con su utilización a bordo de aeronaves, sino con las condiciones necesarias para producirlo y suministrarlo de manera certificada, sostenible y económicamente viable. Su desarrollo requiere considerar simultáneamente materias primas, rutas tecnológicas, procesos de certificación, infraestructura productiva, almacenamiento, distribución, regulación y mecanismos de financiamiento.

Esta situación se refleja en el desarrollo del BIS durante 2026, que ha considerado casos de negocio concretos y ha evaluado requerimientos técnicos, disponibilidad de materias primas, tecnologías, necesidades de infraestructura y principales brechas para su materialización. Asimismo, el estudio ha involucrado actores vinculados con la logística de combustibles,

almacenamiento, distribución aeroportuaria, comercialización y suministro a las aeronaves, con el propósito de acercar los proyectos a una condición de mayor preparación para la inversión (JAC, 2026).

En consecuencia, la complejidad constituye una condición relevante para la adopción del SAF en Chile, debido a que su implementación requiere resolver de manera conjunta distintos aspectos técnicos, productivos, logísticos, regulatorios y económicos. Esto permite diferenciar la relativa facilidad de incorporación de un SAF certificado y compatible con el sistema aeronáutico de la mayor complejidad asociada al desarrollo de una oferta nacional continua y competitiva.

Posibilidad de prueba

La posibilidad de probar la innovación antes de una adopción de mayor escala se observa en experiencias de utilización operacional y de evaluación técnica desarrolladas en torno al SAF. En 2023, JetSMART recibió un Airbus A320neo cuyo vuelo de traslado desde Estados Unidos hacia Chile se realizó utilizando una mezcla de aproximadamente 27 % de SAF. Este antecedente demuestra la utilización operacional de una aeronave destinada a operar posteriormente en Chile mediante una mezcla que incorporaba SAF (Airbus, 2023).

Sin embargo, este caso corresponde a un vuelo específico de traslado y no constituye evidencia de producción nacional ni de un sistema de abastecimiento comercial regular de SAF en los aeropuertos chilenos. Por ello, puede considerarse como evidencia de utilización operacional y de la posibilidad técnica de emplear SAF, pero no como evidencia de adopción comercial nacional.

A estas experiencias se suma el desarrollo realizado en 2025 por la Universidad de Concepción, en colaboración con ENAP y Nutra Trade, que permitió obtener un primer litro de combustible de aviación a partir de residuos plásticos. Si bien el producto obtenido no correspondía a un SAF certificado, la experiencia constituye un antecedente de experimentación tecnológica en Chile y permitió avanzar en la evaluación de una alternativa de producción a partir de residuos, con miras a su eventual escalamiento a una planta piloto (Universidad de Concepción, 2025). Desde la perspectiva de la posibilidad de prueba, este antecedente resulta relevante porque permite evaluar una alternativa tecnológica a pequeña escala antes de comprometer recursos asociados a una implementación de mayor magnitud.

Al mismo tiempo, el hecho de que el producto aún no correspondiera a un SAF certificado evidencia que la experimentación tecnológica constituye una etapa previa a la adopción, en la que todavía deben resolverse aspectos técnicos y de certificación antes de alcanzar una aplicación comercial.

A ello se suman las pruebas técnicas desarrolladas por ENAP durante 2026 para evaluar la producción nacional de SAF mediante la ruta de coprocesamiento de aceites de cocina usados. Estas pruebas permiten analizar la viabilidad de producir SAF utilizando infraestructura de refinación existente, antes de avanzar hacia una eventual implementación comercial (Agencia de Sostenibilidad Energética, 2026).

Estas experiencias muestran que en Chile se han generado instancias de experimentación que permiten evaluar alternativas tecnológicas y reducir incertidumbres antes de comprometer inversiones de mayor escala. Sin embargo, deben diferenciarse de una adopción comercial, ya que corresponden a etapas de utilización puntual y evaluación técnica.

Observabilidad

La observabilidad del SAF en Chile se analiza a partir de los antecedentes disponibles sobre su desarrollo, considerando los avances en planificación, estudios técnicos y evaluación de posibles proyectos. Estos antecedentes, que se presentan a continuación, permiten distinguir entre los avances observables en la preparación de su implementación y los resultados de adopción comercial, que aún no se encuentran consolidados en el país.

La Hoja de Ruta SAF 2050 estableció objetivos y acciones para impulsar el desarrollo de la industria nacional, incluyendo líneas relacionadas con regulación, mercado, tecnología, capacidades y ecosistema de actores. Entre sus metas se encuentra alcanzar una participación de 50 % de SAF en el combustible utilizado por la aviación de Chile al año 2050 (Ministerio de Energía et al., 2024).

Posteriormente, el Estudio de Factibilidad sobre el Uso de SAF en Chile desarrollado por la OACI permitió profundizar en las materias primas, rutas tecnológicas, infraestructura y condiciones necesarias para la producción y utilización de este combustible en el país. El estudio identificó oportunidades para el desarrollo de una cadena de suministro y posibles alternativas de producción, proporcionando una base técnica para las siguientes etapas de implementación (Lecocq, 2025).

Durante 2026, el proceso avanzó hacia una etapa de mayor especificidad mediante el BIS, orientado a evaluar técnica y económicamente casos de negocio concretos de producción de SAF. El estudio ha considerado materias primas, tecnologías, infraestructura, logística y brechas para la materialización de los proyectos, incluyendo reuniones con actores vinculados con almacenamiento, distribución aeroportuaria, comercialización y suministro a las aeronaves. Su conclusión estaba prevista para fines de diciembre de 2026, seguida de su revisión y publicación durante el primer trimestre de 2027 (JAC, 2026).

Por lo tanto, la evidencia disponible permite observar una progresión desde la definición de objetivos y la identificación de oportunidades hacia la generación de información técnica, experiencias de utilización y evaluación de casos concretos de implementación. Esta progresión incrementa la información disponible para los potenciales adoptantes y contribuye a reducir gradualmente la incertidumbre asociada al desarrollo del SAF en Chile.

Finalmente, si bien la teoría de Rogers contempla categorías de adoptantes como innovadores, adoptantes tempranos y mayoría temprana, entre otras, no se asigna a Chile una categoría específica en este análisis, debido a que la evidencia disponible no permite establecer de manera consolidada niveles de adopción comercial, volúmenes regulares de SAF utilizados ni participación sostenida del combustible en el mercado nacional. En consecuencia, el análisis se limita a caracterizar las condiciones y evidencias observables del proceso de adopción mediante los cinco atributos de la innovación.

4. Conclusiones

La presente investigación evaluó el rol estratégico de los Combustibles Sostenibles de Aviación (SAF) en Chile considerando su posicionamiento en el sistema aeronáutico y energético nacional, sus implicancias ambientales, económicas y sociales, los instrumentos regulatorios y económicos asociados a su desarrollo y las condiciones que inciden en su adopción. Los resultados permiten concluir que su aporte estratégico más directo y actualmente mejor sustentado corresponde a la descarbonización de la aviación, debido a su compatibilidad con el sistema aeronáutico existente y a su potencial de reducción de emisiones de ciclo de vida. Sus posibles contribuciones a la seguridad energética, la valorización de residuos y el desarrollo productivo dependen, en mayor medida, de que Chile logre establecer producción nacional sostenible y económicamente viable.

Chile ha avanzado desde la definición de lineamientos generales hacia la evaluación de alternativas concretas de implementación. La Hoja de Ruta SAF 2050, el Estudio de Factibilidad desarrollado bajo ACT-SAF y el Business Implementation Study muestran una progresión desde la planificación hacia el análisis técnico y económico de posibles proyectos. Sin embargo, todavía no existe producción comercial consolidada ni un suministro continuo de SAF a escala nacional. La demanda proyectada, además, presenta una elevada concentración en el Aeropuerto Arturo Merino Benítez, que concentraría aproximadamente el 84 % de la demanda nacional en 2030, aspecto relevante para futuras decisiones de almacenamiento, distribución y suministro.

En materia de producción, se identificaron alternativas asociadas a aceites de cocina usados, residuos agrícolas y forestales, residuos sólidos municipales y combustibles sintéticos vinculados al hidrógeno renovable. La disponibilidad teórica de estos recursos no equivale a disponibilidad efectiva, ya que la recuperación, la logística, la competencia con otros usos y la infraestructura condicionan el volumen realmente aprovechable. En el caso de los aceites de cocina usados, la cobertura estimada de aproximadamente un 4,1 % de la demanda nacional de combustible de aviación en 2035 depende de recolectar el 75% del potencial proyectado y utilizar una configuración HEFA orientada a maximizar SAF. Este resultado evidencia que, el UCO aunque sea una alternativa relevante, no sería suficiente por sí solo para abastecer una demanda de SAF a gran escala, por lo que sería necesario complementar

con distintas materias primas y tecnologías.

La aplicación del enfoque Triple Bottom Line mostró que la sostenibilidad del SAF no puede determinarse únicamente por el origen renovable o residual de una materia prima. La reducción efectiva de emisiones depende del ciclo de vida completo; económicamente, las principales restricciones corresponden a la diferencia de costo respecto del combustible convencional, las necesidades de inversión y la incertidumbre de mercado; y, desde la dimensión social, se identificaron oportunidades de formación de capital humano y nuevas actividades productivas, aunque la evidencia disponible no permite cuantificar con suficiente respaldo la generación de empleo.

El análisis de los instrumentos regulatorios y económicos mostró que ningún mecanismo individual permite resolver todas las barreras identificadas. Las medidas orientadas a generar demanda pueden aportar mayor previsibilidad, mientras que los instrumentos financieros y tributarios pueden actuar sobre las necesidades de inversión y el diferencial de precio. Para Chile, estos mecanismos deberían combinarse de manera progresiva y mantenerse vinculados a la capacidad efectiva de suministro, la infraestructura disponible y las condiciones de sostenibilidad.

La Teoría de Difusión de Innovaciones de Rogers permitió establecer que la compatibilidad del SAF constituye una condición favorable por su carácter drop-in, mientras que su ventaja relativa se concentra actualmente en el desempeño ambiental y no en una ventaja económica frente al combustible convencional. Las pruebas y evaluaciones desarrolladas en Chile aumentan la posibilidad de experimentación y la observabilidad del proceso, pero no constituyen evidencia de adopción comercial consolidada. Por ello, la información disponible no permite clasificar a Chile dentro de una categoría específica de adoptantes de Rogers.

En materia de seguridad energética y gestión de residuos, el uso de SAF importado puede contribuir a reducir emisiones, pero no necesariamente disminuye la dependencia externa del abastecimiento energético. Del mismo modo, la valorización de residuos depende de la cantidad efectivamente recuperable, los usos alternativos y los impactos asociados a su transporte y transformación. Estos beneficios, por tanto, no pueden atribuirse de manera general a cualquier alternativa de SAF.

Dentro del alcance documental definido, los cuatro objetivos específicos fueron abordados.

La metodología permitió integrar evidencia nacional e internacional, aunque el uso de información secundaria limita la posibilidad de determinar la rentabilidad de proyectos específicos, cuantificar con precisión la generación de empleo o estimar el efecto sobre la dependencia energética nacional. Estas materias requieren evaluaciones técnico-económicas, ambientales y logísticas específicas. Como continuidad de la investigación, resulta pertinente profundizar en la disponibilidad efectiva de materias primas, los costos y desempeño ambiental de alternativas concretas y las condiciones necesarias para transformar los estudios actualmente existentes en proyectos de producción.

En conclusión, Chile se encuentra en una etapa de preparación y evaluación previa a la consolidación de un mercado de SAF. En comparación con Brasil, que ya estableció obligaciones progresivas de reducción de emisiones mediante SAF a partir de 2027 (Brasil, 2024), Chile aún no cuenta con un mandato equivalente. Esta diferencia evidencia un mayor avance regulatorio de Brasil en este ámbito, aunque no permite por sí sola, determinar el grado de desarrollo industrial del SAF en ambos países. El desafío estratégico no consiste únicamente en aumentar su consumo, sino en transformar las alternativas identificadas en proyectos capaces de integrar disponibilidad efectiva de materias primas, desempeño ambiental verificable, viabilidad económica, infraestructura, financiamiento y demanda. Bajo estas condiciones, el SAF puede constituir una herramienta relevante para la descarbonización de la aviación y, cuando exista producción nacional, ampliar su contribución hacia la seguridad energética, la valorización de residuos y la generación de valor para el país.

5. Bibliografía

Agencia de Sostenibilidad Energética. (2026, 9 de julio). *Chile presenta el estudio sobre el potencial de los aceites de cocina usados (UCO) para impulsar la producción de combustibles de aviación sostenibles (SAF).* https://www.agenciase.org/2026/07/09/chile-presenta-el-estudio-sobre-el-potencial-de-los-aceites-de-cocina-usados-uco-para-impulsar-la-produccion-de-combustibles-de-aviacion-sostenibles-saf/

Airbus. (2023, noviembre). *JetSMART takes delivery of its first Mobile-built aircraft.* https://www.noticiaslatamsales.com/noticias/november-2023/jetsmart-takes-delivery-its-first-mobile-built-aircraft/

ASTM International. (2026). *Standard specification for aviation turbine fuel containing synthesized hydrocarbons* (ASTM D7566-26). https://store.astm.org/d7566-26.html

Boulding, K. E. (1966). The economics of the coming spaceship Earth. En H. Jarrett (Ed.), *Environmental quality in a growing economy* (pp. 3–14). Resources for the Future/Johns Hopkins University Press. https://www.panarchy.org/boulding/spaceship.1966.html

Brasil. (2024). *Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024.* Presidência da República. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l14993.htm

Brasil. (2026). *Decreto nº 13.094, de 12 de agosto de 2026.* Presidência da República. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2026/decreto/d13094.htm

Chile. (2022). *Ley N.º 21.455: Ley Marco de Cambio Climático.* Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=1177286&t=0

Department for Transport. (2024). *The SAF mandate: An essential guide.* GOV.UK. https://www.gov.uk/government/publications/about-the-saf-mandate/the-saf-mandate-an-essential-guide

Ellen MacArthur Foundation. (s. f.). *Circular economy principles.* https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-principles

Elkington, J. (2004). Enter the triple bottom line. En A. Henriques & J. Richardson (Eds.), *The triple bottom line: Does it all add up?* (pp. 1–16). Earthscan. https://johnelkington.com/archive/TBL-elkington-chapter.pdf

Harder, A., & Warner, L. A. (2009). *Planned behavior change: An overview of the diffusion of innovations* (WC089). UF/IFAS Extension. https://ask.ifas.ufl.edu/publication/WC089

International Air Transport Association. (2021). *Resolution on the industry's commitment to*

reach net zero carbon emissions by 2050. https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/iata-agm-resolution-on-net-zero-carbon-emissions.pdf

International Air Transport Association. (2026, 6 de junio). *SAF production volumes still disappointing.* https://www.iata.org/en/pressroom/2026-releases/06-06-saf-production-volumes-still-disappointing/

International Energy Agency. (2025). *Aviation.* https://www.iea.org/energy-system/transport/aviation

International Organization for Standardization. (2006a). *Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework* (ISO 14040:2006). https://www.iso.org/standard/37456.html

International Organization for Standardization. (2006b). *Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines* (ISO 14044:2006). https://www.iso.org/standard/38498.html

International Organization for Standardization. (2024). *Circular economy—Vocabulary, principles and guidance for implementation* (ISO 59004:2024). https://www.iso.org/standard/80648.html

Internal Revenue Service. (2026). *Clean Fuel Production Credit.* U.S. Department of the Treasury. https://www.irs.gov/credits-deductions/clean-fuel-production-credit

Junta de Aeronáutica Civil. (2024, 27 de noviembre). Chile realizó workshop ACT-SAF con miras a evaluar la factibilidad para la producción de combustibles de aviación sostenibles (SAF).https://www.jac.gob.cl/chile-realizo-workshop-act-saf-con-miras-a-evaluar-la-factibilidad-para-la-produccion-de-combustibles-de-aviacion-sostenibles-saf/

Junta de Aeronáutica Civil. (2026, 17 de agosto). *OACI y Vuelo Limpio avanzan en el desarrollo de Business Implementation Study para producir SAF en Chile.* https://www.jac.gob.cl/oaci-y-vuelo-limpio-avanzan-en-el-desarrollo-de-business-implementation-study-para-producir-saf-en-chile/

LATAM Airlines Group. (2025). *ESG supporting document 2025.* https://www.latamairlines.com/content/dam/latamxp/sites/sostenibilidad/esg.pdf

Lecocq, A. (2025). *Estudio de factibilidad sobre el uso de combustibles sostenibles de aviación en Chile.* Organización de Aviación Civil Internacional. https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/Documents/ACT-SAF/Estudio_de_factibilidad_Chile.pdf

Lee, D. S., Fahey, D. W., Skowron, A., Allen, M. R., Burkhardt, U., Chen, Q., Doherty, S. J., Freeman, S., Forster, P. M., Fuglestvedt, J., Gettelman, A., De León, R. R., Lim, L. L., Lund, M. T., Millar, R. J., Owen, B., Penner, J. E., Pitari, G., Prather, M. J., … Wilcox, L. J. (2021). The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment, 244*, 117834. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834

Ministerio de Energía. (2020). *Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde: Chile, fuente energética para un planeta cero emisiones.* Gobierno de Chile. https://energia.gob.cl/consultas-publicas/estrategia-nacional-de-hidrogeno-verde

Ministerio de Energía. (2022). *Política Energética Nacional 2050: Actualización 2022.* https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/202203_pen_foliado.pdf

Ministerio de Energía. (2024). *Plan de Acción de Hidrógeno Verde 2023–2030.* https://energia.gob.cl/documentos/plan-de-accion-hidrogeno-verde-2023-2030

Ministerio de Energía, Junta de Aeronáutica Civil, Agencia de Sostenibilidad Energética, & Programa Vuelo Limpio. (2024). *Acuerdo Público-Privado SAF 2024.* https://vuelolimpio.cl/wp-content/uploads/2024/11/Acuerdo-Publico-Privado-SAF-2024.pdf

Ministerio de Energía, Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, Junta de Aeronáutica Civil, Agencia de Sostenibilidad Energética, Programa Vuelo Limpio, & Banco Interamericano de Desarrollo. (2024). *Hoja de Ruta SAF 2050.* https://vuelolimpio.cl/wp-content/uploads/2024/08/Hoja_de_Ruta_SAF_2050.pdf

Ministerio del Medio Ambiente. (2021). *Estrategia Climática de Largo Plazo de Chile: Camino a un desarrollo bajo en emisiones y resiliente al clima.* https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2025/01/13-Estrategia-Climatica-de-Largo-Plazo.pdf

Ministerio del Medio Ambiente. (2024). *Informe consolidado de emisiones y transferencias de contaminantes del RETC 2022.* Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes. https://retc.mma.gob.cl/books/informe-consolidado-de-emisiones-y-transferencias-de-contaminantes-del-retc-2022/

Ministério de Portos e Aeroportos. (2026, 15 de septiembre). *Aberta consulta pública sobre metas de redução de emissões para companhias aéreas.* https://www.gov.br/portos-e-aeroportos/pt-br/assuntos/noticias/2026/09/aberta-consulta-publica-sobre-metas-de-

reducao-de-emissoes-para-companhias-aereas

Nogueira, V., Delgadillo, L. I., Pérez, L., Vásquez, N., & Valenzuela, M. de los Á. (2026). *Estudio del mercado de aceites usados de cocina en Chile y su potencial como insumo para elaborar diésel renovable y SAF.* Agencia de Sostenibilidad Energética. https://vuelolimpio.cl/wp-content/uploads/2026/07/Informe-final_UCO_SAF_HVO.pdf

Okolie, J. A., Awotoye, D., Tabat, M. E., Okoye, P. U., Epelle, E. I., Ogbaga, C. C., Güleç, F., & Oboirien, B. (2023). Multi-criteria decision analysis for the evaluation and screening of sustainable aviation fuel production pathways. *iScience, 26*(6), 106944. https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106944

Organización de Aviación Civil Internacional. (s. f.-a). *SAF conversion processes.* https://www.icao.int/SAF/saf-conversion-processes

Organización de Aviación Civil Internacional. (s. f.-b). *Sustainable Aviation Fuels (SAF).* https://www.icao.int/SAF

Organización de Aviación Civil Internacional. (2022). *Resolution A41-21: Consolidated statement of continuing ICAO policies and practices related to environmental protection—Climate change.* https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/Assembly/Resolution_A41-21_Climate_Change.pdf

Organización de Aviación Civil Internacional. (2023a). *ACT-SAF Series #3: SAF technology and certification.* https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/Documents/ACT-SAF/ACT-SAF-series-3-SAF-production-technologies-and-certification.pdf

Organización de Aviación Civil Internacional. (2023b). *ACT-SAF Series #5: SAF conversion processes.* https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/Documents/ACT-SAF/ACT-SAF-series-5-SAF-conversion-processes.pdf

Organización de Aviación Civil Internacional. (2023c). *ICAO Global Framework for Sustainable Aviation Fuels (SAF), Lower Carbon Aviation Fuels (LCAF) and other Aviation Cleaner Energies.* https://www.icao.int/Meetings/CAAF3/Documents/ICAO%20Global%20Framework%20on%20Aviation%20Cleaner%20Energies_24Nov2023.pdf

Organización de Aviación Civil Internacional. (2024). *CORSIA FAQs: Questions about CORSIA's key design elements.* https://www.icao.int/sites/default/files/2025-07/CORSIA_FAQs_Apr2024.pdf

Organización de Aviación Civil Internacional. (2025a**).** *CORSIA methodology for calculating actual life cycle emissions values* (7th ed.). https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA Eligible Fuels/ICAO-document-07-Methodology-for-Actual-Life-Cycle-Emissions-November-2025.pdf

Organización de Aviación Civil Internacional. (2025b). *CORSIA sustainability criteria for CORSIA eligible fuels* (4th ed.). https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Eligible%20Fuels/ICAO-document-05-Sustainability-Criteria-June-2025.pdf

Organización de Aviación Civil Internacional. (2025c). Declaración consolidada de las políticas y prácticas permanentes de la OACI relativas a la protección del medioambiente – Plan de Compensación y Reducción de Carbono para la Aviación Internacional *(CORSIA).* A42-WP/28. https://www.icao.int/sites/default/files/Meetings/a42/Documents/WP/wp_028_es.pdf

Organización de Aviación Civil Internacional. (2026a, junio). *CORSIA eligible fuels.* https://www.icao.int/CORSIA/corsia-eligible-fuels

Organización de Aviación Civil Internacional. (2026b). *ICAO guidance on policy measures for SAF development and deployment.* https://www.icao.int/SAF/saf-guidance-policy-measures

Paltsev, S., Gurgel, A., Morris, J., Chen, H., Allroggen, F., & Keogh, N. (2024). *Sustainable decarbonization of aviation in Latin America.* MIT Center for Sustainability Science and Strategy. https://cs3.mit.edu/publication/118414

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2023). *Reglamento (UE) 2023/2405 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 18 de octubre de 2023, relativo a la garantía de unas condiciones de competencia equitativas para un transporte aéreo sostenible (ReFuelEU Aviation). Diario Oficial de la Unión Europea.* https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32023R2405

Plan de Acción de Chile para reducir las emisiones de CO_2 provenientes de la aviación civil internacional (2.ª ed.). (2025). https://www.icao.int/sites/default/files/ENV/State%20Action%20Plan/Plan-de-Accion-Chile-2da-Edicion-2025.pdf

Programa Vuelo Limpio. (s. f.). *SAF: Combustibles de Aviación Sostenibles.* Agencia de Sostenibilidad Energética. https://vuelolimpio.cl/saf/

Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of innovations* (5th ed.). Free Press.

Sagardía Parga, R., Bahamóndez Villarroel, C., Ávila Campos, A., Reyes Gallardo, R., Sanhueza Venegas, R., & Vergara Asenjo, G. (2024). *Los recursos forestales en Chile 2024: Inventario forestal nacional de bosques nativos y actualización de plantaciones forestales.* INFOR. https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/32863

Scientific Applications International Corporation. (2006). *Life cycle assessment: Principles and practice* (EPA/600/R-06/060). U.S. Environmental Protection Agency. https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P1000L86.TXT

U.S. Department of Energy, U.S. Department of Transportation, U.S. Department of Agriculture, & U.S. Environmental Protection Agency. (2022). *SAF Grand Challenge Roadmap: Flight plan for sustainable aviation fuel.* U.S. Department of Energy. https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-09/beto-saf-gc-roadmap-report-sept-2022.pdf

United Nations Framework Convention on Climate Change. (2015). *Paris Agreement.* https://unfccc.int/sites/default/files/parisagreement_publication.pdf

Universidad de Concepción. (2025, 14 de agosto). *Hito nacional: UdeC entregó a subsecretario de Energía el primer litro de combustible de aviación hecho con plásticos reciclados.* https://vrid.udec.cl/combustible-hecho-con-plasticos-reciclados/