

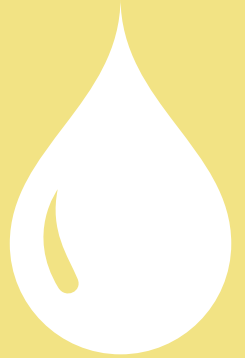
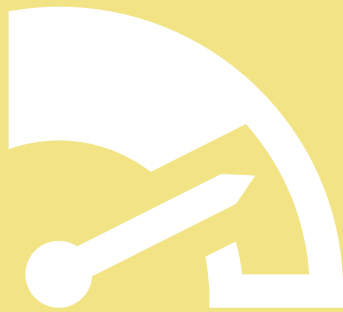


ICAO

PROYECTO FINANCIADO POR

AIRBUS

PERÚ



ESTUDIO DE FACTIBILIDAD SOBRE EL USO DE COMBUSTIBLES DE AVIACIÓN SOSTENIBLES

Autor: **Freddy Segundo Navarro Pineda**

Consultor técnico de la OACI sobre combustibles de aviación sostenibles

Proyecto financiado por:

AIRBUS

Proyecto desarrollado conjuntamente con:



Este documento se elaboró en el marco del Proyecto de Asistencia ACT-SAF de la OACI a la República del Perú, financiado por una contribución de Airbus al Fondo de la OACI para el Medio Ambiente.

© OACI 2025. Todos los derechos reservados.

Las opiniones expresadas son fruto del análisis técnico del autor y no reflejan necesariamente las opiniones individuales o colectivas ni las posiciones del Perú, de Airbus o de la OACI.

Las denominaciones empleadas en esta publicación y la forma en que aparecen presentados los datos que contiene no implican ninguna opinión sobre la condición jurídica de países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni sobre la delimitación de sus fronteras o límites. Las líneas punteadas y discontinuas de los mapas, en caso de aparecer, representan líneas fronterizas aproximadas sobre las que aún puede no haber pleno acuerdo.

La mención de determinadas sociedades mercantiles o de nombres comerciales de ciertos productos no implica que se dé preferencia sobre otros de naturaleza similar que no se mencionan.

Se han tomado todas las precauciones razonables para verificar la información contenida en esta publicación. No obstante, el material se publica sin garantías de ningún tipo, expresas o implícitas, en cuanto a la exactitud, integridad y actualidad de la información. La OACI y sus asociados declinan expresamente toda responsabilidad derivada de, o relacionada con, cualquier interpretación o uso del material contenido en este informe.

PRÓLOGO

En junio de 2022, con motivo del 50º aniversario del Convenio de Estocolmo, la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) puso en marcha el programa de Asistencia, Fortalecimiento de Capacidades y Formación para Combustibles de Aviación Sostenibles (ACT-SAF) para ayudar a los estados en desarrollo en su transición hacia energías más limpias para la aviación.

Más adelante, en 2022, la 41ª Asamblea de la OACI adoptó un objetivo global aspiracional a largo plazo (LTAG) para la aviación civil internacional: el objetivo colectivo de emisiones netas cero de carbono para 2050, como contribución a la acción climática global en línea con los objetivos del Acuerdo de París de la CMNUCC. La Asamblea de la OACI, a través de la Resolución A41-21, enfatizó la necesidad de un apoyo específico a los estados en desarrollo, incluyendo un mayor acceso a recursos financieros, transferencia de tecnología e iniciativas de fortalecimiento de capacidades.

Con la adopción en la 3ª Conferencia de la OACI sobre Combustibles Alternativos de Aviación (CAAF/3) en noviembre de 2023 del Marco Global de la OACI para Combustibles de Aviación Sostenibles (SAF), Combustibles de Aviación de Bajo Carbono (LCAF) y otras Energías Más Limpias de la Aviación, la OACI y sus Estados Miembros han acordado esforzarse por lograr una visión global y aspiracional colectiva para reducir las emisiones de CO₂ en la aviación internacional en un 5% para 2030 mediante el uso de SAF, LCAF y otras energías más limpias para la aviación (en comparación con el uso cero de energía más limpia).

La Visión tiene cuatro pilares, el tercero de los cuales es el soporte a la implementación. Expresa la importancia del apoyo a los países en desarrollo y a los Estados con necesidades particulares, que debe abordarse a través del programa ACT-SAF. Este debería ser un programa sólido y sustancial de apoyo a la capacidad y la implementación, diseñado para ayudar a los Estados, fomentar alianzas y colaboración en iniciativas de las SAF bajo la coordinación de la OACI y servir como plataforma global para el intercambio de conocimientos. En la Resolución A42-21, la 42ª Asamblea de la OACI decidió adoptar esta visión y solicitó al Consejo de la OACI que continúe implementando el Programa ACT-SAF para apoyar la ampliación global en el desarrollo y despliegue de SAF, LCAF y otras energías más limpias para la aviación.

En 2024, Airbus realizó una contribución financiera voluntaria al Fondo de Medio Ambiente de la OACI para financiar tres estudios de viabilidad. En febrero de 2025, la OACI envió una carta a la Dirección General de Aeronáutica Civil del Perú para que fuera beneficiaria del proyecto.

Este estudio de viabilidad evalúa el potencial para producir y utilizar combustible sostenible de aviación sin cita (SAF) en Perú, asegurando la alineación con los criterios de sostenibilidad ambiental y socioeconómica del Esquema de Compensación y Reducción de Carbono para la Aviación Internacional (CORSIA) de la OACI. Sigue las directrices establecidas en la *Plantilla de la OACI para Estudios de Viabilidad sobre Combustibles de Aviación Sostenibles* y la *Guía para Estudios de Viabilidad sobre Combustibles de Aviación Sostenibles* (Versión 1, Julio 2023).¹

¹ ICAO (2025), *ICAO Assistance, Capacity-building and Training for Sustainable Aviation Fuels*

AGRADECIMIENTOS

Este Estudio de Factibilidad no hubiera sido posible sin el invaluable compromiso y liderazgo de la Dirección General de Aviación Civil (DGAC) del Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú, cuya participación y coordinación han sido fundamentales para poder desarrollar el presente estudio de factibilidad.

También debe reconocerse el papel instrumental de las muchas partes interesadas nacionales e internacionales que han contribuido al desarrollo de este trabajo al proporcionar información y orientación valiosas para identificar el potencial de SAF en el país, las cuales se encuentran enumeradas en el Anexo A1.

RESUMEN EJECUTIVO

ANTECEDENTES

El presente estudio analiza el potencial de producción de combustibles sostenibles de aviación (SAF, por sus siglas en inglés) en el Perú, en un contexto global en el que el sector aéreo enfrenta el desafío de alcanzar la neutralidad de carbono hacia 2050. La aviación representa aproximadamente el 2.5% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI), y los SAF se consideran la principal alternativa tecnológica disponible a corto y mediano plazo para reducir dichas emisiones sin modificar la infraestructura aeronáutica existente.

En el ámbito nacional, el Perú aún no cuenta con una hoja de ruta específica para el desarrollo de SAF. No obstante, el país dispone de una base sólida en materia de bioenergía, con experiencia en la producción de biocombustibles líquidos a partir de caña de azúcar y aceites vegetales. Además, existen flujos significativos de residuos agrícolas, pecuarios y urbanos susceptibles de valorización energética, así como un marco institucional en evolución bajo la conducción del Ministerio del Ambiente (MINAM), el Ministerio de Energía y Minas (MINEM) y la DGAC.

El estudio se desarrolló en tres fases complementarias: (1) recopilación y análisis de información nacional sobre disponibilidad de materias primas, (2) evaluación técnica y ambiental de distintas rutas tecnológicas de conversión y (3) identificación participativa de barreras y oportunidades mediante un taller de divulgación con actores del sector público, privado y académico. Los resultados obtenidos permiten estimar el potencial teórico y más probable de producción de SAF al año 2050, así como las implicaciones económicas, sociales y ambientales asociadas a su despliegue.

HALLAZGOS CLAVE

La Figura RE resume el potencial máximo teórico y más probable de SAF estimado para el Perú bajo niveles actuales y futuros (2050) de disponibilidad de materia prima. Los resultados muestran que el Perú posee un potencial máximo teórico de producción de SAF de 39 096 kt/año², equivalente a casi 8 veces el consumo nacional proyectado de Jet-A1 en 2050. Sin embargo, al considerar restricciones técnicas, logísticas y de recolección, el potencial más probable se reduce a 8 217 kt/año, es decir, una cobertura 1.7 veces mayor a la demanda nacional proyectada. Esta brecha entre el potencial teórico y el realizable refleja la influencia de factores estructurales como la dispersión geográfica de los recursos, la limitada infraestructura de acopio y transporte, y la competencia por el uso de materias primas con otros sectores productivos.

² En este texto la unidad 1 kt hace referencia a 1 kilotonelada = 10³ t.

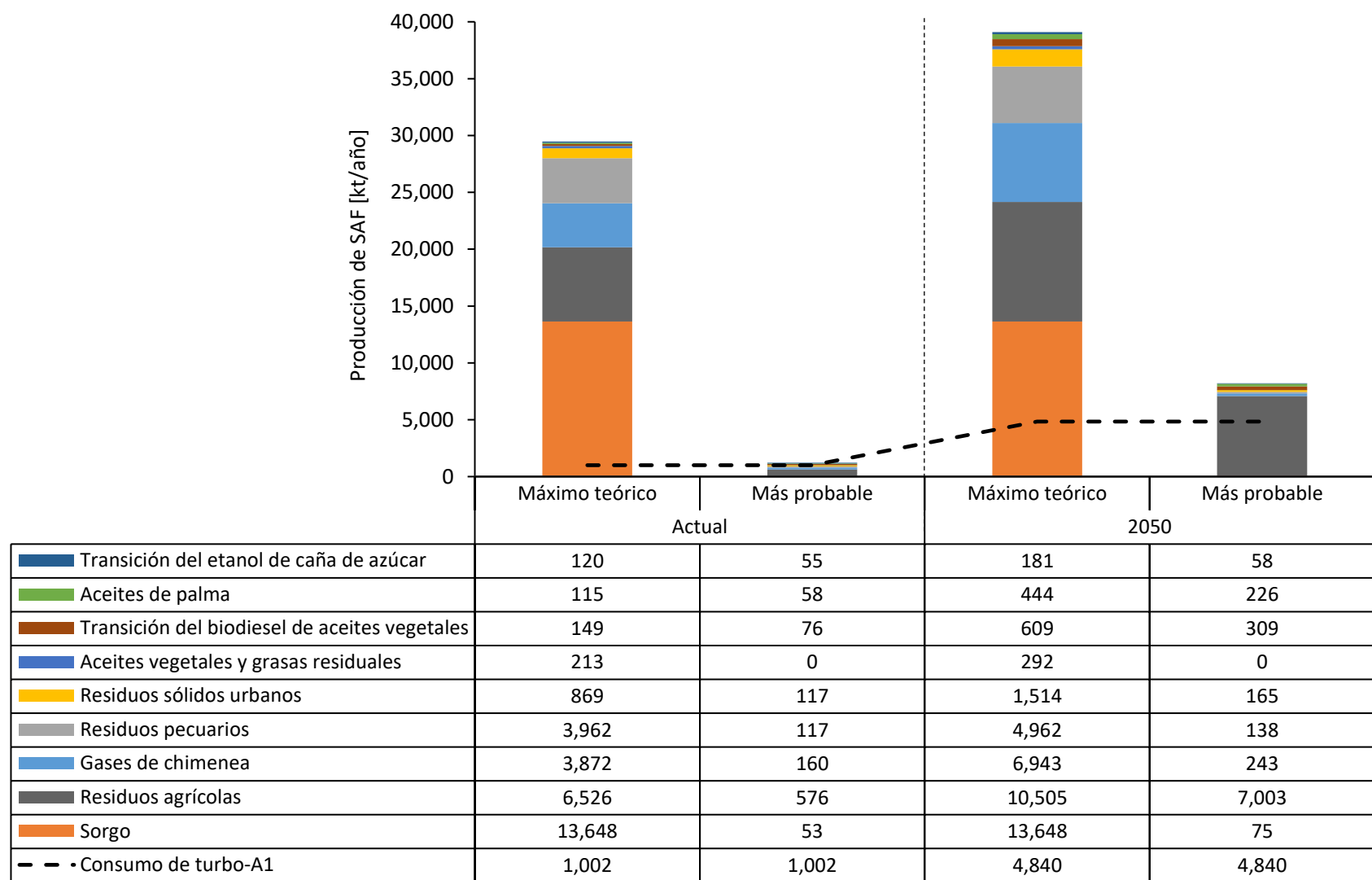


Figura RE. Resumen del potencial máximo teórico y más probable de SAF estimado para el Perú.

IMPLICACIONES POLÍTICAS

Los resultados evidencian la urgencia de establecer una mesa multisectorial permanente que articule a los actores clave vinculados con la producción y uso de SAF en el Perú. Esta mesa debería integrar a representantes de diferentes ministerios (MINAM, MINEM, PRODUCE, MTC), las universidades, la industria de refinación, aerolíneas y gobiernos regionales, con el propósito de construir consensos sobre las condiciones políticas, económicas, tecnológicas y regulatorias necesarias para el desarrollo del sector.

La creación de este espacio de concertación permitiría definir prioridades y hojas de ruta conjuntas sin imponer una visión sectorial aislada. Entre sus funciones esenciales estarían: (1) establecer criterios comunes de sostenibilidad y certificación, (2) coordinar incentivos fiscales y financieros para proyectos piloto, (3) promover la integración de SAF en los planes de transición energética y transporte aéreo y (4) garantizar la participación de actores regionales para aprovechar los recursos disponibles de forma equitativa y descentralizada.

Asimismo, la mesa podría servir como mecanismo de gobernanza para canalizar cooperación técnica internacional y facilitar acuerdos entre productores de materias primas, refinerías, aerolíneas y autoridades aeronáuticas. De este modo, se favorecería una implementación progresiva de SAF en el país bajo un esquema concertado, transparente y alineado con las políticas de mitigación climática y desarrollo sostenible del Perú.

OPORTUNIDADES Y DESAFÍOS

La Tabla RE resume las oportunidades y desafíos identificados en la producción potencial de SAF en el Perú. En conjunto, los resultados de este estudio evidencian que el éxito del SAF en el Perú dependerá de la cooperación efectiva entre sectores y niveles de gobierno, del establecimiento de una gobernanza participativa y del aprovechamiento integral de los recursos locales. Con ello, el país podría posicionarse como referente regional en producción sostenible de combustibles para la aviación, contribuyendo simultáneamente a la reducción de emisiones, al desarrollo rural y a la diversificación de su matriz energética.

Tabla RE. Resumen de las oportunidades y desafíos que enfrenta la producción de SAF en el Perú.

Oportunidades	<ul style="list-style-type: none">• Abundancia de residuos agrícolas y urbanos valorizables.• Existencia de infraestructura refinadora adaptable.• Sinergias con políticas de gestión de residuos, cambio climático y transición energética.• Potencial elevado de empleo verde y desarrollo regional.
Retos y barreras	<ul style="list-style-type: none">• Falta de un marco normativo específico.• La escasez de infraestructura logística.• Altos costos iniciales de inversión.• Ausencia de incentivos financieros.• Limitada articulación entre actores públicos y privados

CONTENIDO

ANTECEDENTES	6
HALLAZGOS CLAVE	6
IMPLICACIONES POLÍTICAS	8
OPORTUNIDADES Y DESAFÍOS	8
CONTENIDO.....	9
ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS	11
SECCIÓN 1. INFORMACIÓN ESPECÍFICA DEL ESTADO	15
1.1 GEOGRAFÍA Y CLIMA	15
1.1.1 Regiones geográficas y climas	15
1.1.2 Bosques	15
1.2 COMERCIO Y GOBIERNO	16
1.2.1 Política interna	16
1.2.2 Comercio exterior	17
1.3 DEMOGRAFÍA	19
1.4 VULNERABILIDAD ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO	19
1.5 AGRICULTURA	20
1.6 PERFIL ENERGÉTICO	23
1.6.1 Balance energético y refinerías	23
1.6.2 El sector eléctrico	24
1.7 EL SECTOR DE AVIACIÓN	27
1.7.1 Estadísticas del combustible de aviación	27
1.7.2 Estructura de precios del Jet-A1	28
1.7.3 Infraestructura aeroportuaria	30
1.7.4 Concurrencia de los aeropuertos	31
SECCIÓN 2. EVALUACIÓN DE MATERIAS PRIMAS Y VÍAS PARA LA PRODUCCIÓN DE SAF	34
2.1 PROCESOS DE CONVERSIÓN PARA SAF	34
2.2 EVALUACIÓN GENERAL DE LAS MATERIAS PRIMAS	36
2.2.1 Metodología	36
2.2.2 Resultados	37
2.3 EVALUACIÓN POR MATERIA PRIMA	43
2.3.1 Residuos sólidos urbanos (RSU)	43
2.3.2 Residuos agrícolas	48

2.3.3	Sinergia con el etanol de caña de azúcar	53
2.3.4	Transición de biodiésel de aceites vegetales a SAF	58
2.3.5	Aceite de palma.....	63
2.3.6	Aceites residuales.....	67
2.3.7	Cultivos bioenergéticos.....	69
2.3.8	Residuos pecuarios: estiércoles vacuno, avícola y porcino.	73
2.3.9	Gases de chimenea	77
SECCIÓN 3. MECANISMOS DE APOYO Y FINANCIAMIENTO		81
SECCIÓN 4. PLAN DE ACCIÓN.....		85
4.1	MARCO REGULATORIO Y POLÍTICAS	85
4.2	FACTORES CRÍTICOS DE ÉXITO	87
4.3	PRINCIPALES HALLAZGOS	89
4.4	PLAN DE ACCIÓN.....	91
REFERENCIAS.....		95
ANEXOS.....		101
A1.	PARTICIPANTES Y COLABORADORES	101
A2.	CRITERIOS DESEABLES DE LAS MATERIAS PRIMAS POTENCIALES PARA LA PRODUCCIÓN DE SAF.....	103
A3.	CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD DE LAS MATERIAS PRIMAS POTENCIALES PARA LA PRODUCCIÓN DE SAF	103
A4.	CARACTERÍSTICAS DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES EN EL PERÚ.....	105
A5.	CARACTERÍSTICAS DE LOS RESIDUOS AGRÍCOLAS	108
A6.	DISTRIBUCIÓN DE TIPOS DE TIERRAS EN LOS DEPARTAMENTOS DEL PERÚ	109
A7.	SUPUESTOS DE EVALUACIÓN TECNO-ECONÓMICA DE LA PRODUCCIÓN DE SAF	110
A8.	EJEMPLOS DE MODELOS DE NEGOCIO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE SAF	111
A8.1	Producción de SAF a partir de aceites vegetales residuales.....	111
A8.2	Producción de SAF a partir de residuos sólidos urbanos.....	112
A8.3	Producción de SAF a partir de cultivos bioenergéticos	114

ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

ASTM	Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (American Society for Testing and Materials)
ATJ	Ruta de alcohol a turbojet (Jet-A1, Alcohol-to-Jet)
CAAFI	Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative
CHJ	Chorro de Hidrotermólisis Catalítica (Catalytic Hydrothermolysis Jet)
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CORSIA	Plan de Compensación y Reducción de Carbono para la Aviación Internacional (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation)
DGAC	Dirección General de Aviación Civil
FT	Fischer-Tropsch
GEI	Gases de Efecto Invernadero
HC	Ésteres Hidrocraqueados (Hydrocracked Esters)
HEFA	Ésteres y Ácidos Grasos Hidroprocesados (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids)
IGV	Impuesto General de Ventas
INC	Índice de Nocividad de Combustible
ISC	Impuesto Selectivo al Consumo
LCAF	Combustibles de Aviación con Bajas Emisiones de Carbono (Low-Carbon Aviation Fuels)
LEC	Emisiones de Vertederos Evitadas (Landfill Emissions Avoided)
MIDAGRI	Ministerio de Agricultura
MINAM	Ministerio de Medio Ambiente del Perú
MINEM	Ministerio de Energía y Minas
MTC	Ministerio de Transporte y Comunicaciones
MTJ	Ruta de Metanol a turbojet (Jet-A1, Methanol-to-Jet)
OACI	Organización de Aviación Civil Internacional
PE	Periodo de Evaluación
PEN	Soles peruanos
PMV	Precio Mínimo de Venta
POME	Efluente de Molino de Aceite de Palma (Palm Oil Mill Effluent)
REC	Emisiones de Reciclaje Adicionales (Recycling Emissions Credits)
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
SAF	Combustibles Sustentables de Aviación (Sustainable Aviation Fuels)
SIP	Isoparafinas sintetizadas (Synthetic Isoparaffin)
SKA	Queroseno Sintético con Aromáticos (Synthetic Kerosene with Aromatics)
SP	Parafinas sintetizadas (Synthetic Paraffins)
TRL	Technology Readiness Level

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Regiones geográficas y climas en el Perú (Geografía Infinita, 2025).....	15
Figura 2. Extensión de bosques y deforestación en el Perú en 2021. Datos de MINAM (2021b). Áreas en gris representan regiones sin datos.....	16
Figura 3. Mapa político y lingüístico del Perú (Escuela de mapas, 2025).	17
Figura 4. Desglose de los principales productos exportados por el Perú a 2024. Datos de ITC (2025).	18
Figura 5. Exportaciones, importaciones y balanza comercial del Perú. Datos de BCEODData (BCEODData, 2025).	18
Figura 6. Mapa demográfico y pirámide poblacional en el Perú. Datos de 2024 (CPI Research, 2024; PopulationPyramid, 2025).	19
Figura 7. Producción de algunos cultivos en el Perú (MIDAGRI, 2025).....	21
Figura 8. Distribución de la producción de algunos cultivos en el Perú según estadísticas de 2022. Datos de MIDAGRI (2025).	22
Figura 9. Balance nacional de energía en el Perú en 2022. Datos en miles de TEP tomados de MIDAGRI (Carlos Estrella Viceministro de Electricidad; José Neil Meza Segura e Ing. Luis Vílchez León; Ing. Giannina Ibarra Vásquez; Ing. José Luis Caro Jara; Ing. Lucero Luciano de la Cruz, 2023).....	23
Figura 10. Plantas y terminales de Petroperú (Petroperú, 2025).	24
Figura 11. Evolución de la generación de electricidad en el Perú (IEA, 2025).	25
Figura 12. Distribución del potencial de energía solar fotovoltaica (arriba izquierda), eólica (arriba derecha), hidráulica (abajo izquierda) y geotérmica (abajo derecha) en el Perú (Cacciuttolo et al., 2024; Global Solar Atlas, 2025; Schmerler et al., 2019).....	26
Figura 13. Estadísticas de consumo de turbosina en el Perú. Datos de OSINERGIM (2025).	27
Figura 14. Proyección del consumo de turbo A-1 y sus emisiones de GEI en el Perú.....	28
Figura 15. Estadísticas de precios [en soles peruanos: PEN (USD 1 = PEN 3.53)] del Jet-A1 en el Perú en los aeropuertos de Arequipa, Cusco y Lima. Los datos de la tabla son los precios medios, y las barras de error con los rangos mínimos y máximos (Osinergmin, 2025).	29
Figura 16. Infraestructura aeroportuaria en el Perú (Dunnell, 2018; MapTrove, 2025).....	31
Figura 17. Flujo de pasajeros hacia aeropuertos internacionales desde el Perú en el 2024. Datos proporcionados por la DGAC.	33
Figura 18. Metodología para la evaluación general de las materias primas con potencial para la producción de SAF.....	36
Figura 19. Generación de residuos en el Perú en 2023. Datos proporcionados por el MINAM. El contenido de plásticos en el RSU destinado para la producción de SAF debe ser menor al 44% para cumplir con el requerimiento de emisiones de GEI.....	43
Figura 20. Proyección de la producción potencial de SAF en el Perú a partir de RSU.	45
Figura 21. Estimación del PMV del SAF en función del precio del RSU (izquierda) y precio máximo de recolección del residuo para que el SAF alcance un PMV igual al del Jet-A1 en Lima (derecha). No se incluyen impuestos, otras tarifas o costos de distribución. PE, periodo de evaluación (excluyen los años de la construcción de la instalación. Los supuestos en torno a la evaluación se muestran en el Anexo A7.	47
Figura 22. Proyección de la producción máxima teórica, técnica y más probable de SAF a partir de residuos agrícolas en el Perú.	50
Figura 23. Estimación del PMV del SAF en función del precio del residuo agrícola (izquierda) y precio máximo de recolección del residuo para que el SAF alcance un PMV igual al del Jet-A1 en Lima (derecha). No se	

incluyen impuestos, otras tarifas o costos de distribución. PE, periodo de evaluación (excluyen los años de la construcción de la instalación. Los supuestos en torno a la evaluación se muestran en el Anexo A7.	52
Figura 24. Producción e importación de etanol en el Perú (arriba) y superficie cosechada y rendimiento estimado de etanol de caña de azúcar en el Perú (MIDAGRI, 2024, 2025; Torroba & Chiara, 2024).	54
Figura 25. Proyección de la producción máxima teórica y más probable de SAF a partir de etanol en el Perú.	55
Figura 26. Estimación del PMV del SAF en función del precio del etanol de caña de azúcar (izquierda) y precio máximo del etanol para que el SAF alcance un PMV igual al del Jet-A1 en Lima (derecha). No se incluyen impuestos, otras tarifas o costos de distribución. PE, periodo de evaluación (excluyen los años de la construcción de la instalación). Los supuestos en torno a la evaluación se muestran en el Anexo A7.	56
Figura 27. Estimación balance comercial de aceites vegetales en el Perú en el 2022. Datos en kt estimados a partir de MIDAGRI (2025). Dado que no se encontraron estadísticas unificadas locales en torno a la producción de aceite de palma, se usó la utilización del mismo para la estimación del input de aceite.	58
Figura 28. Disponibilidad de biodiésel en el Perú. Datos de Toborra & Chiara (2024).	59
Figura 29. Proyección de la producción máxima teórica, y más probable de SAF a partir de la transición del biodiésel de aceites vegetales.	60
Figura 30. Estimación del PMV del SAF mediante el proceso HEFA en función del precio del aceite vegetal (izquierda) y precio máximo del aceite para que el SAF alcance un PMV igual al del Jet-A1 en Lima (derecha).	61
Figura 31. Estimación del costo de producción del SAF mediante coprocesado en función del precio del aceite vegetal. No se incluyen impuestos, otras tarifas o costos de distribución. PE, periodo de evaluación (excluyen los años de la construcción de la instalación).	62
Figura 32. Superficie cosechada de palma aceitera, utilización, exportación y consumo aparente de aceite de palma en el Perú. Estimaciones a partir de MIDAGRI (2025).	64
Figura 33. Proyección de la producción máxima teórica, y más probable de SAF a partir de aceite de palma.	65
Figura 34. Distribución de la recolección de aceites residuales y su composición en 2023. Datos en toneladas proporcionados por el MINAM.	67
Figura 35. Proyección de la producción máxima teórica, y más probable de SAF a partir de aceites vegetales residuales.	68
Figura 36. Distribución de tierras secas en el Perú (Rau, 2019) y potencial de producción de SAF en regiones áridas y semiáridas a partir de jatropha, pasto elefante o sorgo.	70
Figura 37. Número de cabezas en el sector avícola, porcino y vacuno en el Perú. Datos de MIDAGRI (2025).	74
Figura 38. Distribución de la producción del sector avícola, porcino y vacuno en el Perú en 2023. (MIDAGRI, 2025).	74
Figura 39. Proyección de la producción potencial de SAF en el Perú a partir de residuos pecuarios.	76
Figura 40. Estimación de las emisiones de GEI derivadas de procesos industriales y generación de electricidad en el Perú. Datos de MINAM (2023).	78
Figura 41. Proyección de la producción potencial de SAF en el Perú a partir de gases de chimenea.	78
Figura 42. Estrategias sugeridas para las aerolíneas para la inclusión del SAF en sus actividades.	83
Figura 43. Resumen de las principales políticas que podrían incidir en el desarrollo de SAF a partir de diferentes materias primas en el Perú.	86
Figura 44. Diagrama de pescado de las principales limitantes identificadas en la producción de SAF en el Perú.	88

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Esquema de cálculo del índice de nocividad del combustible en el Perú (CDN, 2024).	29
Tabla 2. Estimación del factor de nocividad del Jet-A1 y del SAF. Datos de (CDN, 2024; Teoh et al., 2022)....	30
Tabla 3. Flujo de pasajeros y vuelos entre algunos aeropuertos domésticos en el Perú durante el año 2024. Datos proporcionados por la DGAC.	32
Tabla 4. Procesos de conversión aprobados para la producción de SAF.....	34
Tabla 5. Procesos de conversión de SAF en proceso de aprobación.....	35
Tabla 6. Ecuaciones para el cálculo de la generación de empleos potenciales por la producción de SAF.....	37
Tabla 7. Resultados de la evaluación de la producción potencial de SAF en el Perú a partir de diversas materias primas.	38
Tabla 8. Fórmulas aplicadas en este estudio (cálculo propio) para la estimación de la producción potencial de SAF a partir de RSU.	44
Tabla 9. Fórmulas aplicadas en este estudio (cálculo propio) para la estimación de la producción potencial de SAF a partir de residuos agrícolas (ICAO, 2021).....	45
Tabla 10. Fórmulas aplicadas en este estudio (cálculo propio) para la estimación de la producción potencial de SAF a partir de residuos agrícolas.	49
Tabla 11. Estimación de la producción potencial de SAF en el Perú a partir de los residuos agrícolas de los principales cultivos.....	49
Tabla 12. Características de la producción de bioenergéticos potenciales en el Perú.....	71
Tabla 13. Fórmulas aplicadas en este estudio (cálculo propio) para la estimación de la producción potencial de SAF a partir de residuos pecuarios.....	75
Tabla 14. Estimación del potencial de producción de SAF a partir de residuos pecuarios en el Perú considerando datos de 2023.....	75
Tabla 15. Resumen de algunas fuentes potenciales para apoyo y financiamiento del desarrollo de la industria de SAF.....	81
Tabla 16. Descripción de algunas políticas que pueden potenciar el desarrollo de la industria del SAF.....	82
Tabla 17. Resumen de algunas políticas para el desarrollo de la industria de SAF.	84
Tabla 18. Resumen de oportunidades y retos identificados para la producción de SAF a partir de diversas materias primas.	90
Tabla 19. Descripción de acciones recomendadas para identificar y establecer cadenas de suministro de SAF viables en el Perú.	92

SECCIÓN 1. INFORMACIÓN ESPECÍFICA DEL ESTADO

1.1 GEOGRAFÍA Y CLIMA

1.1.1 Regiones geográficas y climas

La Figura 1 muestra las regiones geográficas y los climas en el Perú. El país, que tiene una superficie total de 1.28 millones de km², se divide en tres grandes regiones naturales: la costa árida y semiárida del Pacífico, la sierra andina y la selva amazónica húmeda, que representa más del 60% del territorio nacional. El país posee 38 tipos de climas como resultado de la interacción entre su posición geográfica, la presencia de la cordillera de los Andes y su extensión (MINAM, 2025a). La amplia variedad climática en el Perú influye de manera significativa en la disponibilidad de recursos hídricos, el uso del suelo y la distribución de cultivos potenciales para la producción de SAF.

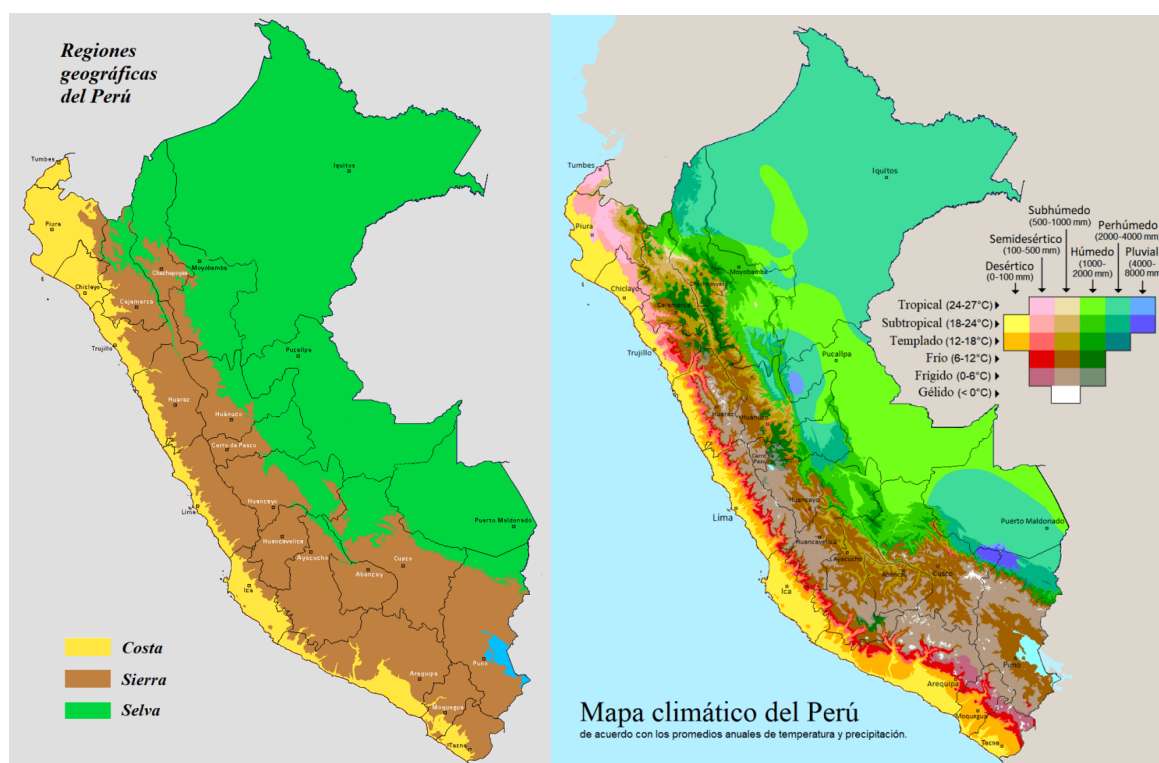


Figura 1. Regiones geográficas y climas en el Perú (Geografía Infinita, 2025).

1.1.2 Bosques

Con más de 69 millones de hectáreas en 2015, es decir, el 60% del territorio nacional, Perú es el segundo país con una mayor extensión de bosques amazónicos en el mundo después de Brasil y el noveno en el planeta en extensión de bosques en general (MINAM, 2015). Sin embargo, de 2001 a 2021 se deforestaron 2 775 012 ha, es decir, en promedio 132 143 ha al año, por lo que, a 2021, la superficie de bosques en el Perú descendió a 67 932 915 ha (MINAM, 2021b). Los departamentos de Ucayali, Madre de Dios, Loreto, Huánuco, Puno y San Martín (Figura 3) representan el 80% de dichas pérdidas con 36 306 ha, 23 142 ha, 19 829 ha, 15 021 ha,

13 080 ha y 13 080 ha perdidas durante 2021, respectivamente (Figura 2). Las causas directas de la deforestación involucran actividades de agricultura, ganadería, extracción forestal, minería aluvial y la expansión de cultivos ilícitos (Diana & Noa, 2021).

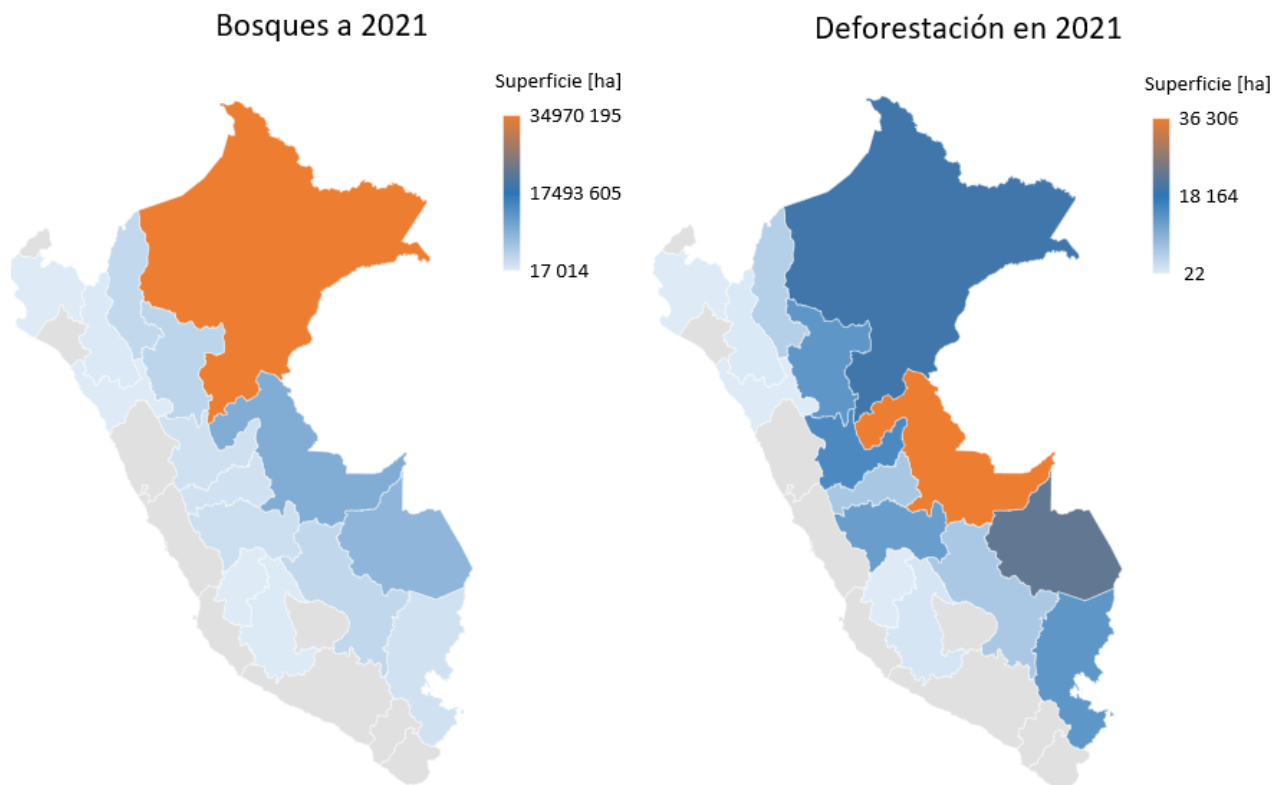


Figura 2. Extensión de bosques y deforestación en el Perú en 2021. Datos de MINAM (2021b). Áreas en gris representan regiones sin datos.

Se estima que el área de tierras secas en el Perú (xérico, hiperárido, árido y semiárido) alcanza unos 346 843 km², es decir, aproximadamente el 27% de la superficie nacional (MINAM, 2011; Rau, 2019), lo cual sugiere un potencial relevante para el desarrollo de cultivos bioenergéticos en suelos marginales, como la jatropha o el sorgo, sin comprometer la seguridad alimentaria ni generar cambios directos o indirectos en el uso de suelo. Esta diversidad también permite evaluar múltiples rutas de producción de SAF según la disponibilidad regional de residuos agrícolas, aceites vegetales o residuos sólidos urbanos.

1.2 COMERCIO Y GOBIERNO

1.2.1 Política interna

El Perú limita en el norte con Ecuador y Colombia, en el este con Brasil, en el sur con Chile y en el oeste con el océano Pacífico. Además, el país está dividido en 25 regiones, cada una con su propia identidad cultural, geográfica y social. De hecho, aunque la lengua oficial es el español, a lo largo y ancho del territorio se hablan numerosas lenguas derivadas de su herencia indígena. La Figura 3 muestra el mapa político y lingüístico del Perú.



Figura 3. Mapa político y lingüístico del Perú (Escuela de mapas, 2025).

Institucionalmente, el país cuenta con una estructura de gobernanza descentralizada, donde los sectores de energía, ambiente, agricultura y transporte son regulados por ministerios específicos, como el MINEM, el MINAM y el MTC. En años recientes, el gobierno ha mostrado un creciente interés en impulsar la transición energética y promover el uso de energías renovables, tal como se refleja en la Estrategia Nacional ante el Cambio Climático al 2050. Sin embargo, aún no existe un marco normativo específico para los SAF, por lo que la articulación interinstitucional y el desarrollo de políticas habilitantes será clave para atraer inversión privada y articular proyectos piloto con apoyo internacional.

1.2.2 Comercio exterior

La Figura 4 muestra el desglose de los principales productos exportados por el Perú en el año 2024. Durante ese año, los minerales de cobre y sus concentrados encabezaron la lista con exportaciones por USD 18 877 millones, consolidando su posición como motor central del comercio exterior. Dentro de la agroindustria no tradicional, los arándanos frescos se ubicaron como el segundo producto más importante, con ventas por USD 2 270 millones (36%), seguidos de las uvas frescas (USD 1 705 millones) y el cacao en grano, que se destacó por su crecimiento exponencial, alcanzando USD 740 millones (incremento del 241%). Asimismo, destacaron otros productos como la harina de pescado (USD 1 535 millones) y el gas natural licuado (USD 1 289 millones), consolidándose como exportaciones relevantes dentro de los rubros tradicionales y energéticos (ITC, 2025). En general, las exportaciones del país revelan tanto la fortaleza de la minería como la diversificación creciente hacia productos agrícolas y pesqueros, lo cual aporta resiliencia y valor agregado al portafolio exportador nacional.

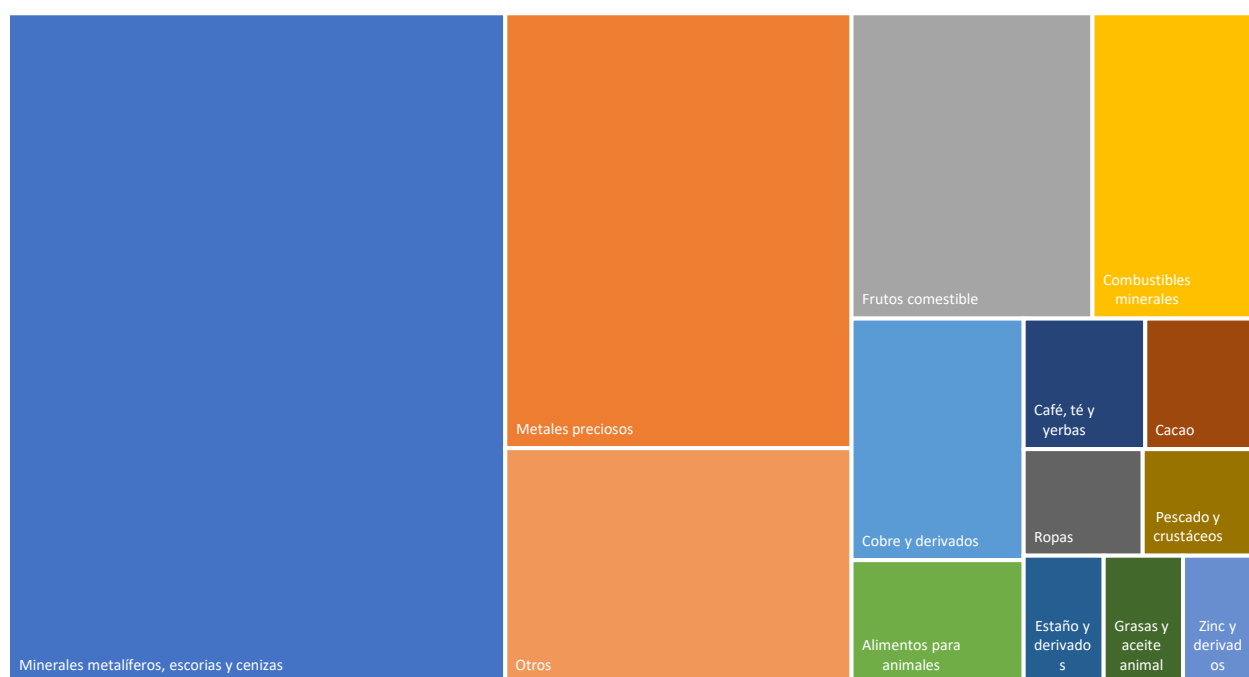


Figura 4. Desglose de los principales productos exportados por el Perú a 2024. Datos de ITC (2025).

La Figura 5 presenta la balanza comercial del Perú, la cual muestra variaciones significativas asociadas tanto a los precios internacionales como a los ciclos económicos globales. Entre 2023 y 2024, el país registró un incremento de un 9.4% y un 6.2% en sus exportaciones e importaciones, respectivamente. En general, Perú mantiene una economía abierta con una sólida red de acuerdos comerciales, incluyendo tratados con Estados Unidos, la Unión Europea, China y países del Mercosur. Estos acuerdos han facilitado el acceso a tecnología, insumos y mercados para productos agrícolas y energéticos, lo que puede ser estratégico para el desarrollo de una cadena de valor de SAF.

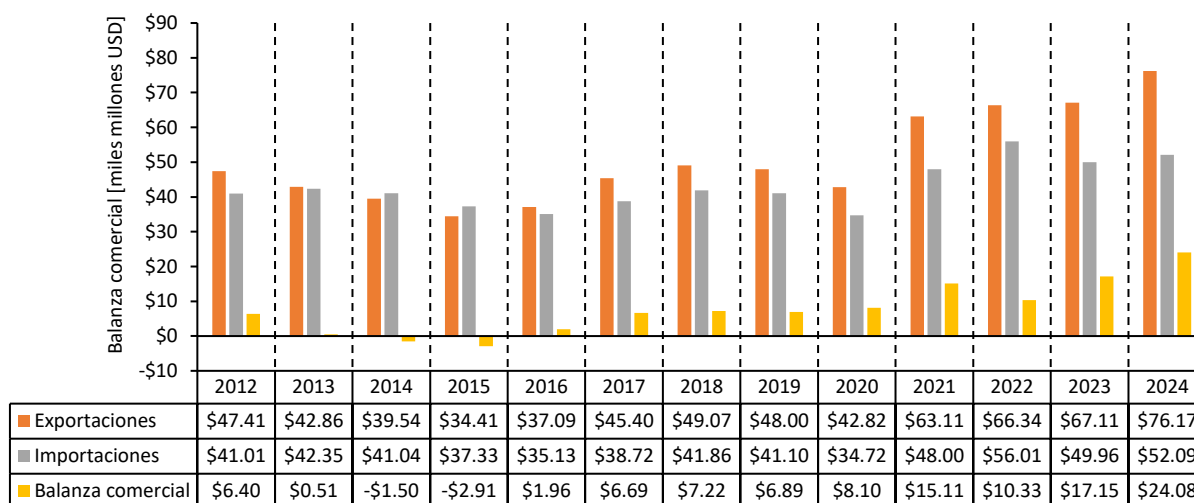


Figura 5. Exportaciones, importaciones y balanza comercial del Perú. Datos de BCEODData (BCEODData, 2025).

1.3 DEMOGRAFÍA

El Perú cuenta con una población de aproximadamente 34 millones de habitantes en 2024, con una densidad media de 27 habitantes por km². La población se concentra principalmente en las áreas urbanas de la costa, siendo Lima la ciudad más poblada y el principal centro económico del país, albergando más del 30% de la población nacional (CPI Research, 2024).

En cuanto a la pirámide de población, el Perú presenta una estructura demográfica que refleja una transición hacia una población de mayor edad. Para 2024, el grupo de menores de 15 años representa aproximadamente el 24% de la población, mientras que la población en edad productiva (15–64 años) constituye un 68% y los adultos mayores (más de 64 años) representan cerca del 8,3% (CPI Research, 2024; Datosmacro, 2025). La Figura 6 muestra la distribución de la densidad poblacional y la pirámide de población del Perú.

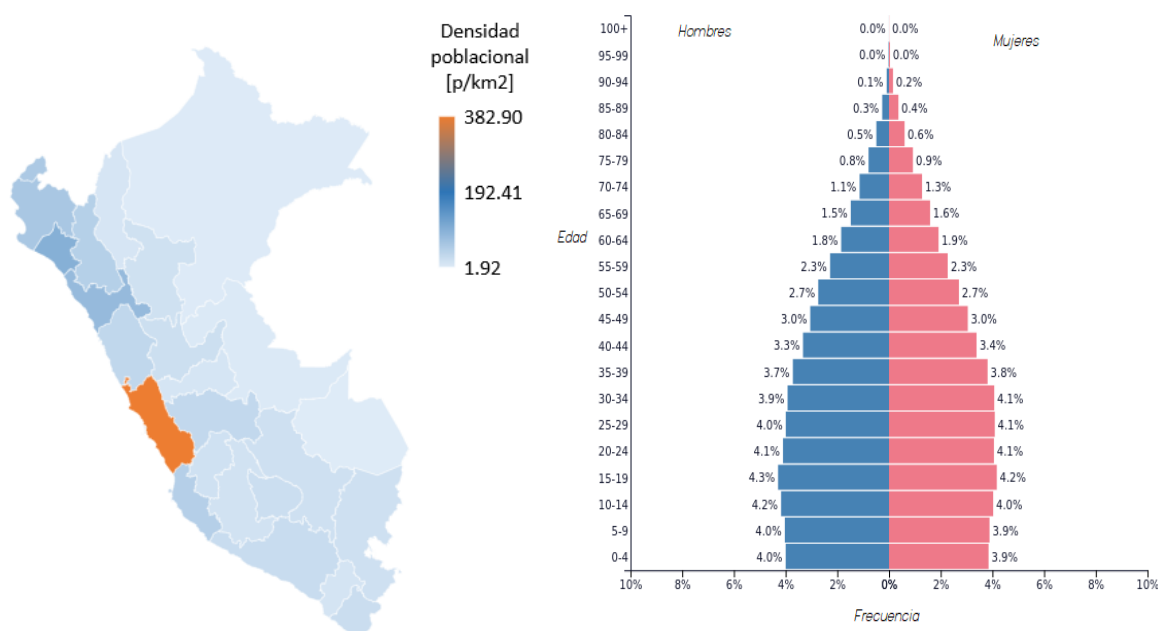


Figura 6. Mapa demográfico y pirámide poblacional en el Perú. Datos de 2024 (CPI Research, 2024; PopulationPyramid, 2025).

La demografía urbana, junto con una creciente clase media y una reactivación progresiva del turismo postpandemia, representa una oportunidad para articular estrategias de transición energética en el sector aéreo, alineadas con el crecimiento económico y el compromiso climático del país. A su vez, la creciente presión por mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero en sectores intensivos en energía subraya la relevancia de establecer una cadena de valor para el SAF que también genere beneficios sociales, como la generación de empleo en zonas rurales a través de la recolección de residuos y la producción de biomasa.

1.4 VULNERABILIDAD ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

En el 2022, el Perú emitió 105.14 Mt CO_{2eq}, contribuyendo al 0.20% de las emisiones globales de GEI, siendo el uso de la tierra y los cambios de su uso los principales contribuyentes con una participación del 48%, seguido por el sector energético (30%) y la agricultura (13.5%) (EDGAR, 2023; MINAM, 2023). A pesar de que las emisiones relativas del país son poco significativas, el Perú es considerado uno de los más vulnerables al cambio climático debido a su diversidad geográfica y climática, así como a la alta dependencia de actividades sensibles como la agricultura y el turismo.

Fenómenos como El Niño y el retroceso de los glaciares andinos impactan negativamente en la disponibilidad de agua, la producción agrícola y la infraestructura energética. Se estima que el cambio climático a 2050 afectaría a más de 1.5 millones de personas dada la alta relación entre el sistema ecológico y social. De hecho, el país presenta 7 de las 9 características de vulnerabilidad reconocidas por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (MINAM, 2021a).

En el ámbito del transporte aéreo, el cambio climático podría afectar las operaciones aeroportuarias, la planificación de vuelos y la infraestructura costera asociada a los principales aeropuertos. La promoción de combustibles de aviación sostenibles se enmarca en los compromisos climáticos asumidos por el país, incluyendo su Contribución Nacionalmente Determinada. En este contexto, el impulso a los SAF representa una opción tecnológica viable y una necesidad estratégica para descarbonizar el transporte aéreo y cumplir los compromisos internacionales adoptados en el marco del Acuerdo de París y de la OACI.

1.5 AGRICULTURA

Según datos del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI), Perú cuenta con una superficie agrícola de más de 11.2 millones de ha (MIDAGRI, 2024). De hecho, el sector agrícola peruano es altamente diverso, incluyendo cultivos como caña de azúcar, arroz, maíz, palma aceitera, café y plátano. La Figura 7 resume la producción de los principales cultivos del Perú de 2016 a 2022 y la Figura 8 muestra su distribución a lo largo del país. Estos cultivos generan residuos lignocelulósicos aprovechables para rutas de conversión termoquímica.

En regiones como la costa norte y la selva amazónica se concentran los cultivos de palma aceitera y caña de azúcar, con potencial para la transición hacia esquemas de biocombustibles avanzados. No obstante, persisten retos asociados a la informalidad del sector, la degradación del suelo, el acceso a tecnologías agrícolas sostenibles y la competencia por el uso del suelo. En este sentido, el uso de residuos y el cultivo en tierras marginales ofrecen ventajas estratégicas para el desarrollo de SAF sin comprometer la seguridad alimentaria ni generar impactos indirectos en el cambio de uso del suelo.

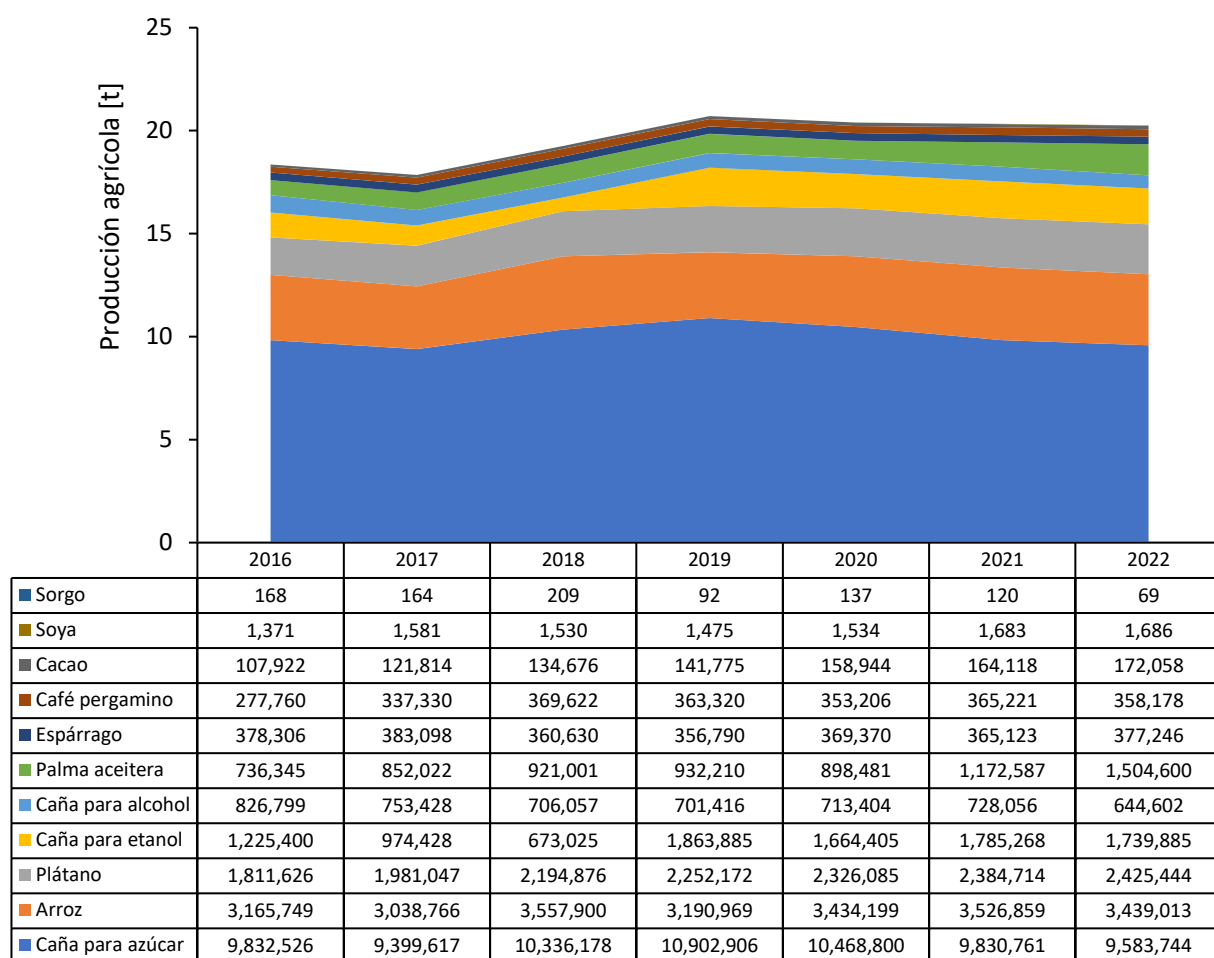


Figura 7. Producción de algunos cultivos en el Perú (MIDAGRI, 2025).

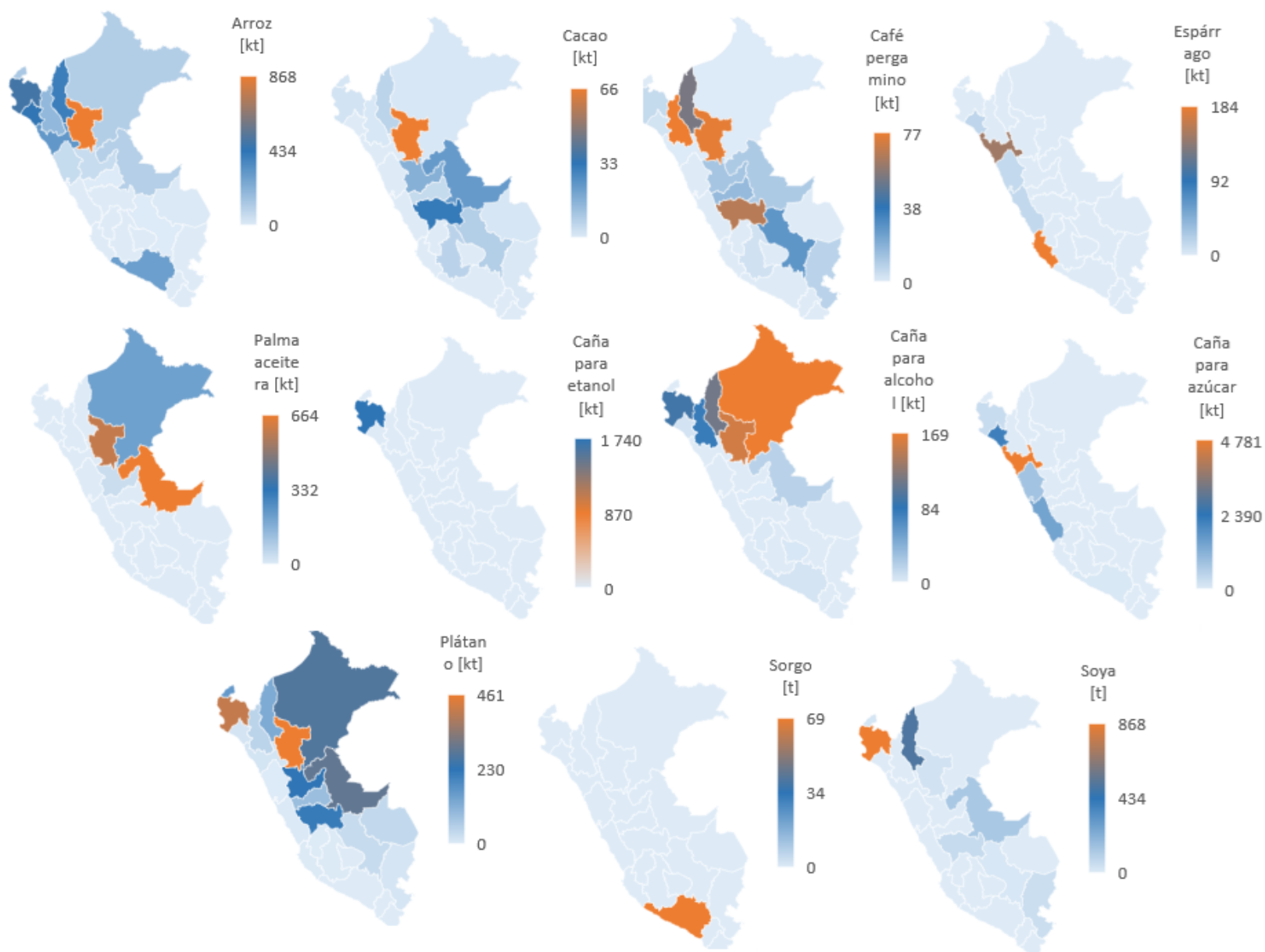


Figura 8. Distribución de la producción de algunos cultivos en el Perú según estadísticas de 2022. Datos de MIDAGRI (2025).

1.6 PERFIL ENERGÉTICO

1.6.1 Balance energético y refinerías

Perú tiene petróleo, siendo la región amazónica y la costa norte los principales focos de producción, aunque también hay potencial en el zócalo continental (offshore). La producción anual alcanza aproximadamente 36 millones de barriles, y existen indicios de yacimientos importantes frente a las costas de Lambayeque y La Libertad. La Figura 9 muestra el balance energético del Perú en el 2022. Las energías renovables contribuyeron un 22.5% a la energía producida en el país, siendo la energía de la biomasa su mayor contribuyente (49%), seguido por la energía hidroeléctrica (47%). Por otra parte, el gas natural es el mayor contribuyente a la producción de energía fósil, con una participación del 91%. Las importaciones contribuyeron en un 21% a la energía disponible en el país, de la cual se exportó el 34%. Los sectores transporte, industrial y residencial consumieron el 38%, el 18% y el 17% de la energía ofertada, respectivamente.

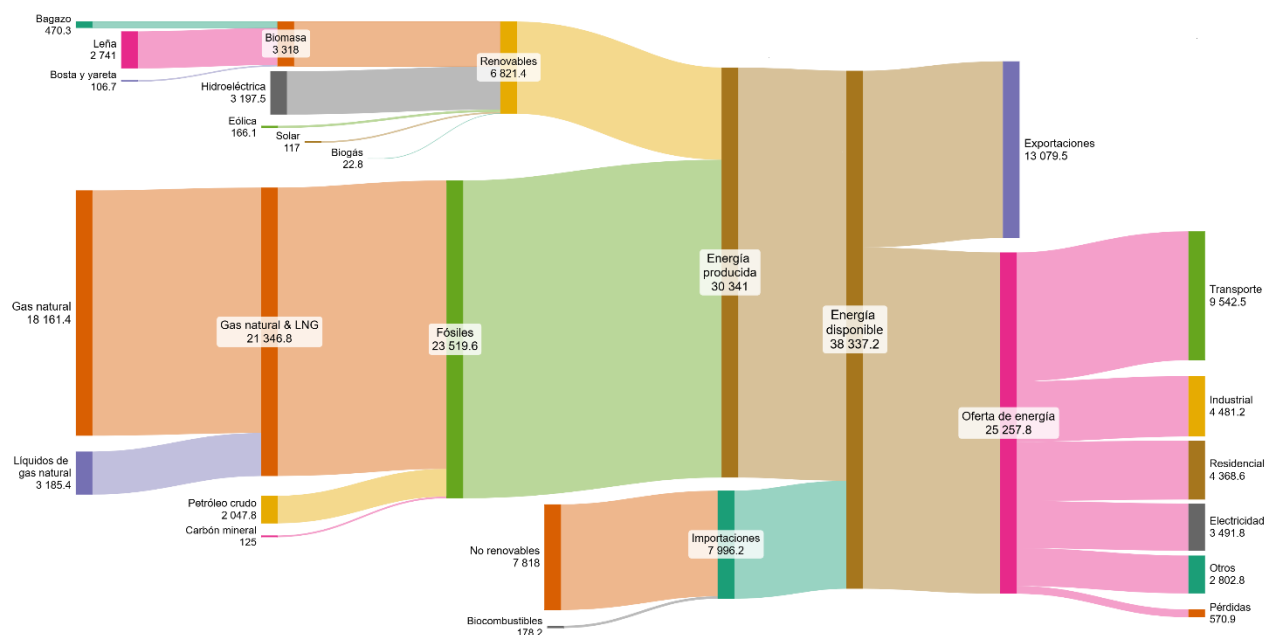


Figura 9. Balance nacional de energía en el Perú en 2022. Datos en miles de TEP tomados de MIDAGRI (Carlos Estrella Viceministro de Electricidad; José Neil Meza Segura e Ing. Luis Vílchez León; Ing. Giannina Ibarra Vásquez; Ing. José Luis Caro Jara; Ing. Lucero Luciano de la Cruz, 2023).

El Perú cuenta con una capacidad instalada total de refinación de aproximadamente 246 700 barriles por día (bpd), repartida entre la estatal Petroperú, que concentra cerca del 45% del total (94 500 bpd en cinco refinerías), y la refinería La Pampilla, propiedad de Repsol, que agrega el 47–48% restante con una capacidad nominal de 117 000 bpd (Apoyo & Asociados, 2025; Repsol, 2025). En el caso de Petroperú, destacan la refinería de Talara, modernizada y con una capacidad de 95 000 bpd para procesar crudos pesados y livianos, así como las refinerías Conchán (15 500 bpd) e Iquitos (12 000 bpd), que abastecen principalmente a Lima y la Amazonía, respectivamente (Apoyo & Asociados, 2025). La Figura 10 muestra la distribución de plantas y terminales de Petroperú. Por su parte, Repsol administra la refinería La Pampilla en Ventanilla–Callao, la más importante del país, con una capacidad de 117 000 bpd. Durante 2024 se implementaron mejoras ambientales, incluyendo unidades de desulfuración y tratamiento de gasolinas compatibles con la normativa EURO6 (Repsol, 2025).

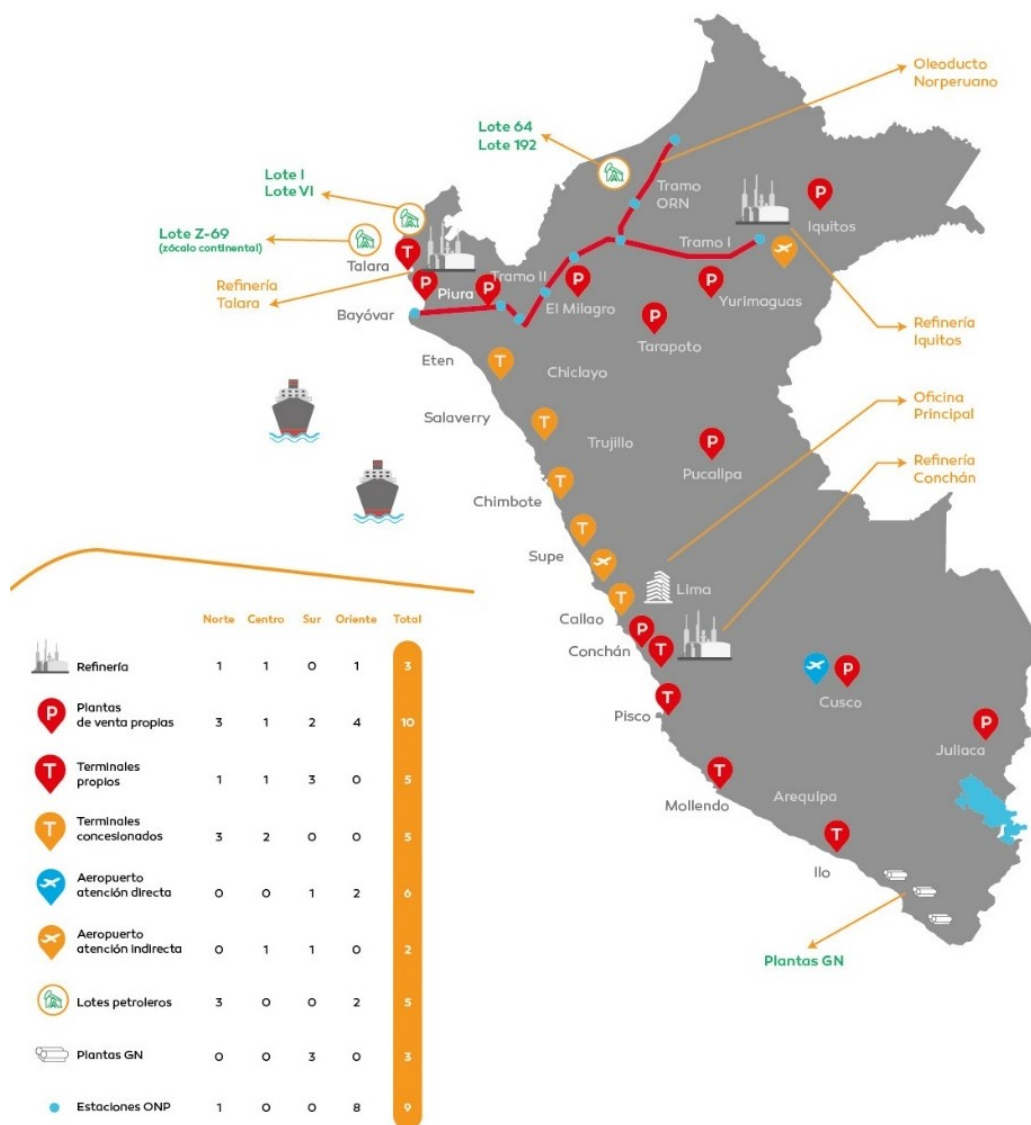


Figura 10. Plantas y terminales de Petroperú (Petroperú, 2025).

La producción nacional de turbosina (Jet-A1, denominada también comúnmente turbo-A1) no cubre la demanda interna, por lo que el país depende parcialmente de importaciones, especialmente a través del terminal marítimo del Callao. Si bien existen experiencias previas en biocombustibles, la infraestructura actual no está adaptada para el procesamiento y distribución de SAF a gran escala.

1.6.2 El sector eléctrico

Actualmente, Perú cuenta con aproximadamente 130 centrales eléctricas gestionadas por unas 64 empresas, incluyendo generadoras térmicas e hidroeléctricas, así como fuentes de energía renovable no convencionales (MINEM, 2025). La Figura 11 muestra la evolución de la generación de electricidad en el Perú. La hidroelectricidad ha contribuido a cerca de la mitad de la generación de energía eléctrica, seguido por el gas natural (43%). Durante 2024, las energías renovables experimentaron crecimientos notables: la generación eólica aumentó un 66% hasta 3 915 GWh y la solar un 32% hasta 1 263 GWh, elevando la producción renovable acumulada a 5 777 GWh, es decir, un 47% más respecto a 2023 (Plataforma del Estado peruano, 2025).

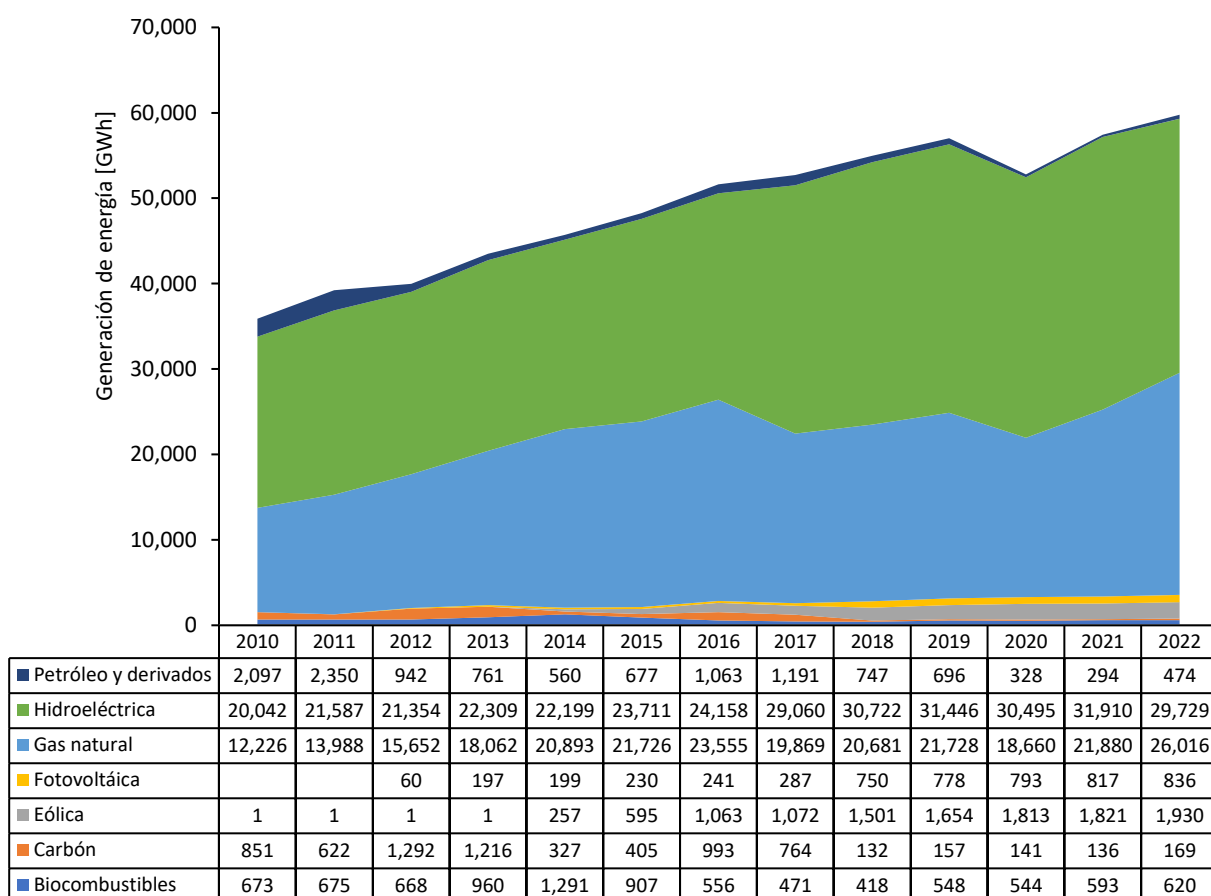


Figura 11. Evolución de la generación de electricidad en el Perú (IEA, 2025).

El Perú cuenta con un amplio potencial de generación de electricidad a partir de fuentes renovables: solar fotovoltaica, eólica, hidráulica y geotérmica (Figura 12). El potencial solar fotovoltaico se estima en unos 25 GW, aprovechando la alta radiación diaria promedio de 250 W/m² (6 kWh/m²/día) en regiones como Arequipa, Moquegua y Tacna. Por su parte, hay un potencial eólico de hasta 22 GW, aprovechando especialmente los vientos de zonas costeras como Ica, Piura y Arequipa. El potencial geotérmico asciende a 3 GW con una alta concentración en el eje volcánico sur (Arequipa, Apurímac, Ayacucho, Moquegua, Tacna, Puno, Cusco y Cajamarca). Finalmente, el potencial técnico aprovechable hidroeléctrico asciende a 69.44 GW, concentrado principalmente en la vertiente atlántica (cerca del 87%) y algunas zonas del Pacífico (por ejemplo, Junín y Chanchamayo) (Schmerler et al., 2019).

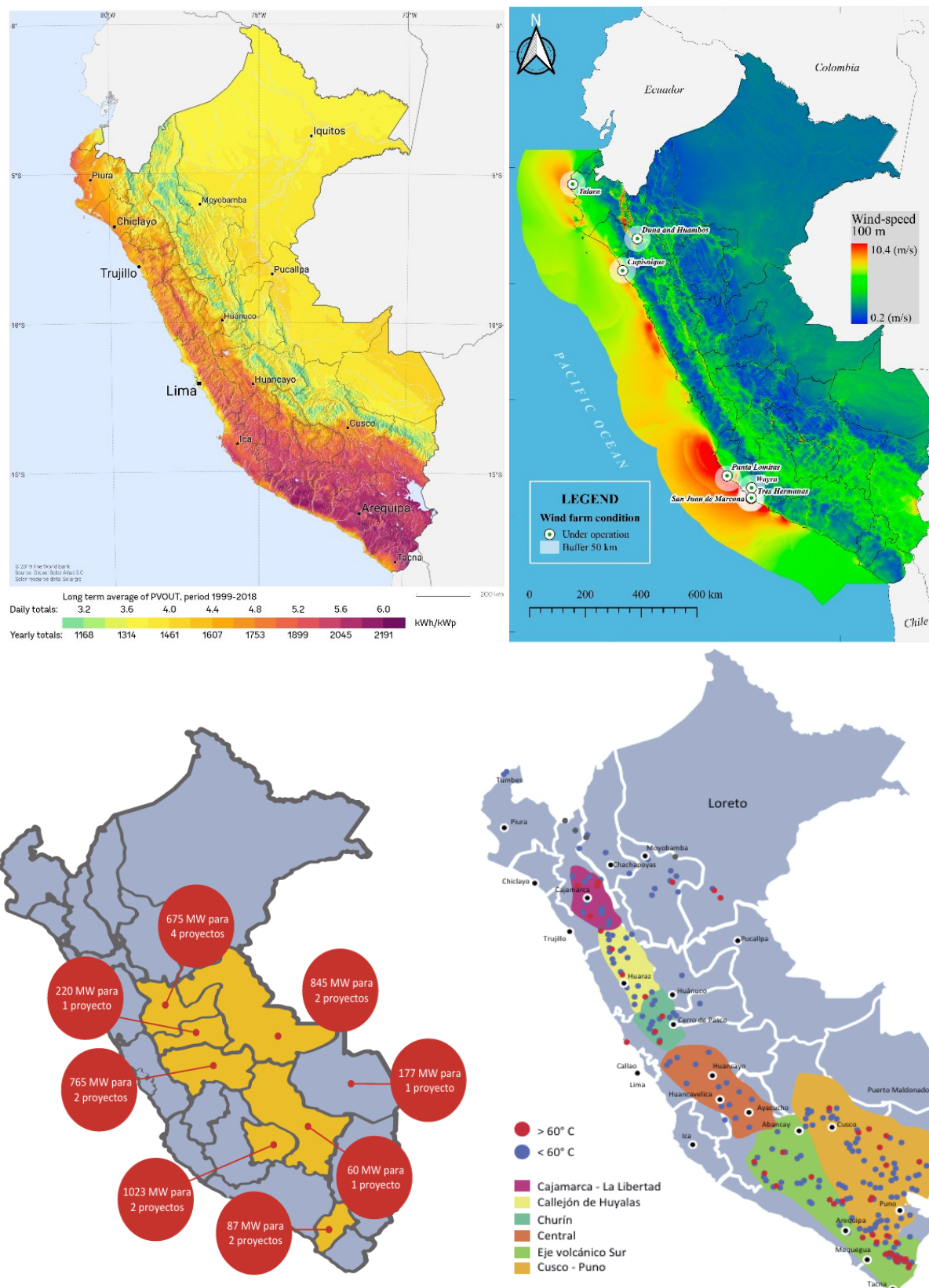


Figura 12. Distribución del potencial de energía solar fotovoltaica (arriba izquierda), eólica (arriba derecha), hidráulica (abajo izquierda) y geotérmica (abajo derecha) en el Perú (Cacciuttolo et al., 2024; Global Solar Atlas, 2025; Schmerler et al., 2019).

1.7 EL SECTOR DE AVIACIÓN

1.7.1 Estadísticas del combustible de aviación

La Figura 13 muestra el consumo de Jet-A1 en el Perú de 2017 a 2024. Entre 2017 y 2019, el consumo total creció de manera constante, alcanzando un máximo en 2019, impulsado principalmente por el aeropuerto de Lima, que concentró más del 95% del consumo nacional. En 2020, como resultado de las restricciones de movilidad y la fuerte caída del tráfico aéreo debido al COVID-19, el consumo total se redujo drásticamente a 431 kt, representando una disminución de más del 60% respecto al año anterior.

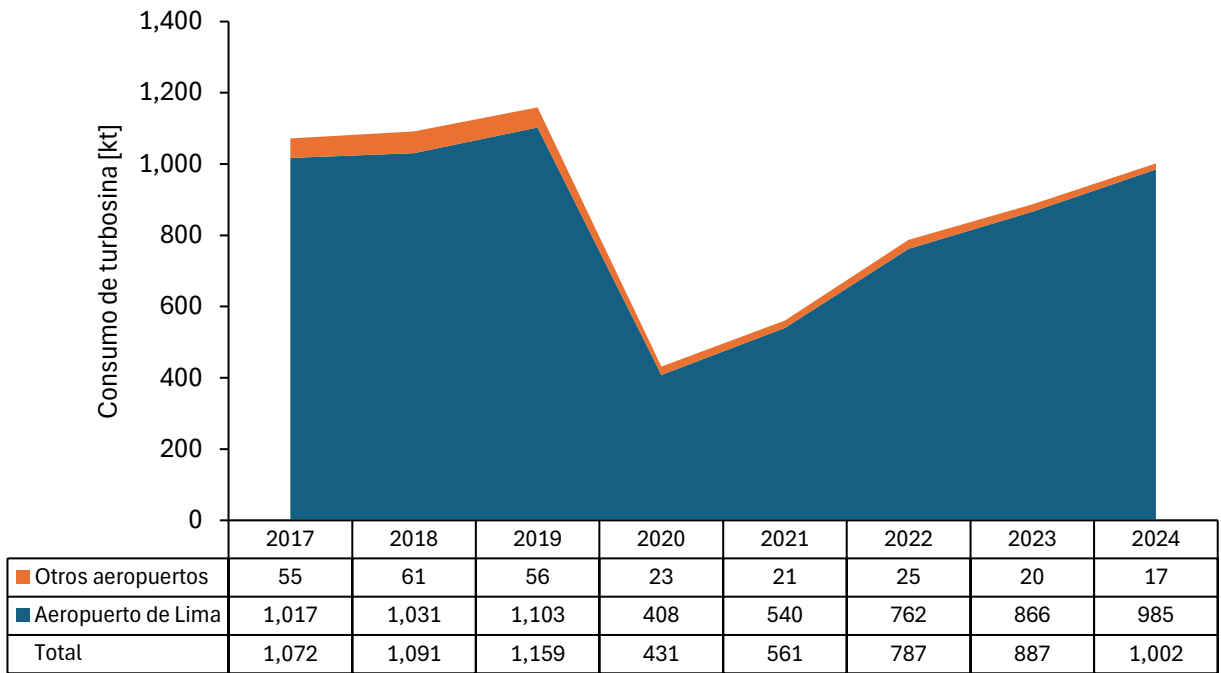


Figura 13. Estadísticas de consumo de turbosina en el Perú. Datos de OSINERGIM (2025).

A partir de 2021, el consumo comenzó a recuperarse progresivamente, llegando a 1 Mt en 2024, aún por debajo del nivel prepandemia. Mientras el aeropuerto de Lima ha ido recuperando su volumen de consumo, el consumo en otros aeropuertos muestra una tendencia decreciente desde 2022, lo que podría indicar una mayor concentración del tráfico aéreo en la capital o una lenta reactivación de rutas regionales. Esta centralización plantea desafíos para una distribución más equitativa del transporte aéreo en el país.

La proyección del consumo de Turbo A-1 en Perú no está disponible públicamente con datos específicos. Por tanto, se ha estimado dicha proyección considerando un enfoque que asume que no hay cambios relevantes políticos o económicos que conlleven su variación significativa. La Figura 14 muestra la proyección a 2050, así como sus correspondientes emisiones de ciclo de vida de GEI. Para ese año, el consumo de Jet-A1 alcanzaría unos 448 Mt, lo que conlleva emisiones acumuladas de 298 Mt de CO₂eq de 2025 a 2050.

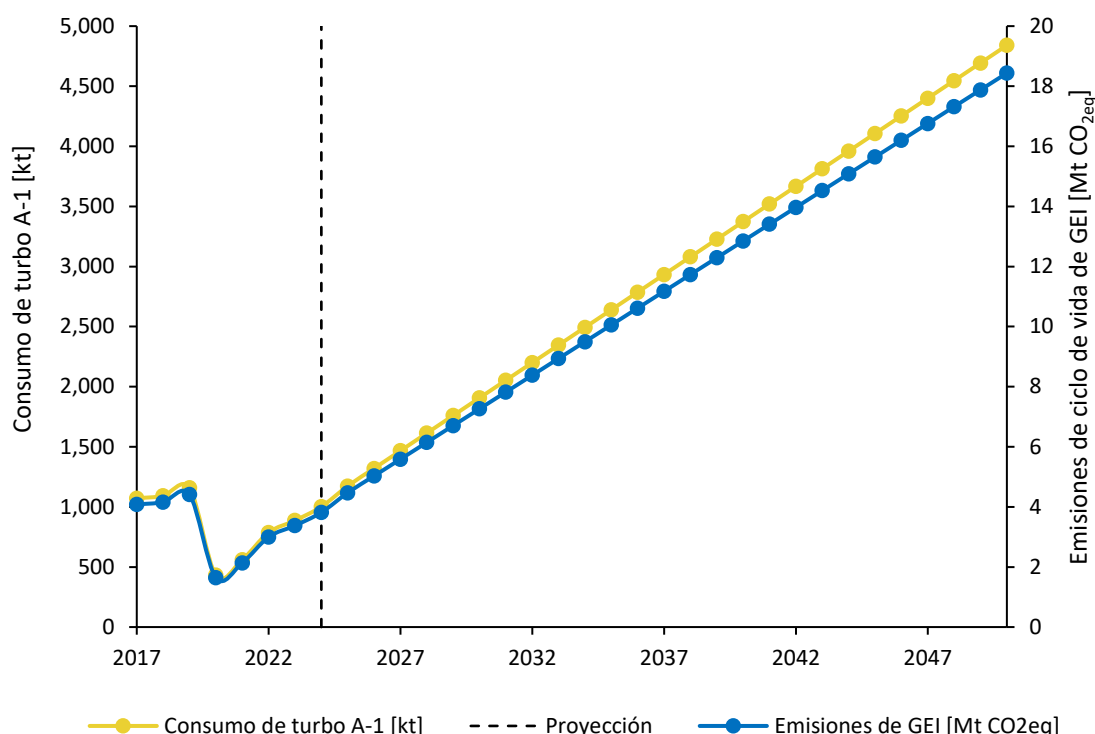


Figura 14. Proyección del consumo de turbo A-1 y sus emisiones de GEI en el Perú.

1.7.2 Estructura de precios del Jet-A1

La Figura 15 resume los precios de la Jet-A1 en el Perú ajustados a valores de 2025. Los datos muestran una evolución significativa entre 2017 y 2024, con variaciones notables entre las regiones de Arequipa, Cusco y Lima. Entre 2017 y 2020, los precios se mantuvieron relativamente estables o con ligeras caídas, especialmente durante 2020, donde se observa un descenso marcado probablemente asociado a la disminución en la demanda global de combustibles por la pandemia de COVID-19. Sin embargo, a partir de 2021, los precios comienzan a incrementarse de manera sostenida, alcanzando su punto máximo en 2023. Este aumento puede explicarse por la recuperación económica postpandemia, tensiones en los mercados energéticos internacionales y posibles restricciones logísticas internas. En 2024 se observa una ligera disminución respecto a 2023, lo que podría indicar una estabilización del mercado o medidas regulatorias para contener los costos del combustible.

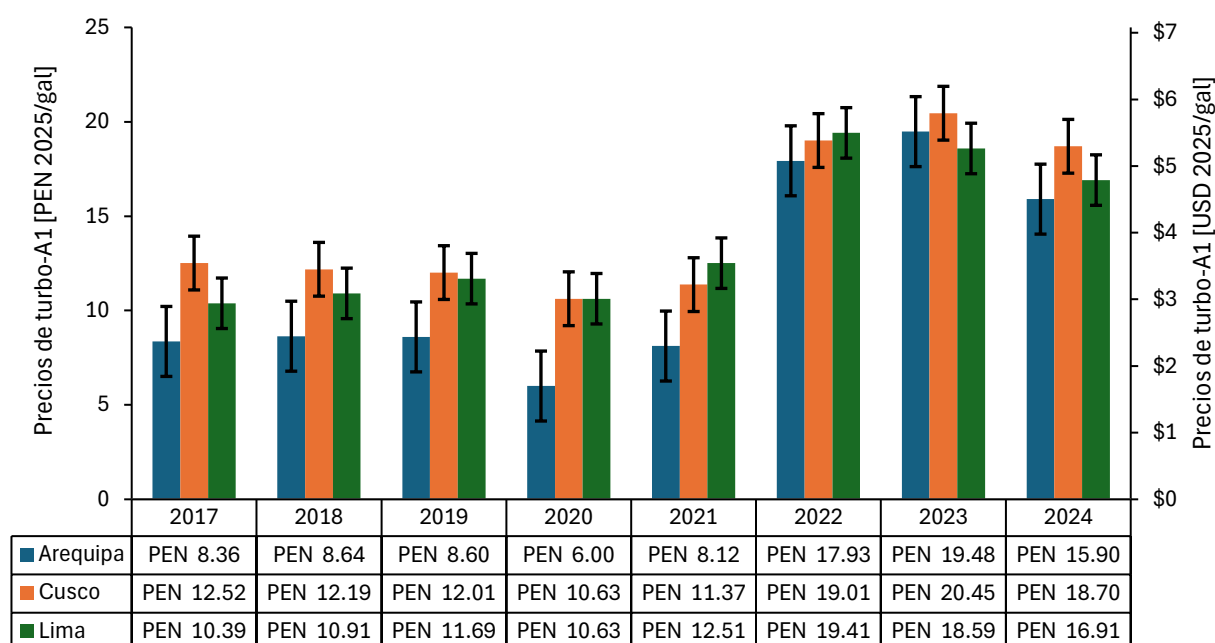


Figura 15. Estadísticas de precios [en soles peruanos: PEN (USD 1 = PEN 3.53)] del Jet-A1 en el Perú en los aeropuertos de Arequipa, Cusco y Lima. Los datos de la tabla son los precios medios, y las barras de error con los rangos mínimos y máximos (Osinerghmin, 2025).

El Jet-A1 está sujeto al Impuesto General de Ventas (IGV) y al Impuesto Selectivo al Consumo (ISC). El primero corresponde a un 18% sobre las ventas, mientras que el segundo depende del Índice de Nocividad del Combustible (INC), el cual, a su vez, depende de sus emisiones durante su combustión, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Esquema de cálculo del índice de nocividad del combustible en el Perú (CDN, 2024).

Eq.	Fórmula	Abreviaciones
(1)	$INC = \frac{FN_{turbo-A1}}{FN_{mínimo}}$	<ul style="list-style-type: none"> • INC, Índice de Nocividad del Combustible • $FN_{turbo-A1}$, factor de nocividad del Jet-A1 • $FN_{mínimo}$, factor de nocividad del combustible con menos emisiones
(2)	$FN = 1.0 \times E_{NOx} + 0.26 \times E_{CO} + 4.0 \times E_{SO2} + 30 \times E_{PM} + 2.0 \times E_{HCNM}$	<ul style="list-style-type: none"> • FN, factor de nocividad • E_{NOx}, emisiones de NO_x del combustible evaluado [g/kg] • E_{CO}, emisiones de CO del combustible evaluado [g/kg] • E_{SO2}, emisiones de SO_2 del combustible evaluado [g/kg] • E_{PM}, emisiones de material particulado del combustible evaluado [g/kg] • E_{HCNM}, emisiones de hidrocarburos no metano [g/kg]

La Tabla 2 muestra una estimación del Factor de Nocividad (FN) para el turbo A1 y el SAF considerando sus respectivas emisiones de combustión. El FN para el SAF es aproximadamente la mitad que el del Jet-A1, el cual, actualmente, tiene una tasa impositiva de PEN 1.93/gal³. De esta manera, un hipotético uso de SAF al 50% podría conllevar una reducción del ISC del 25%. No obstante, actualmente las aerolíneas certificadas (según la ley aeronáutica del Perú) están exentas del pago del ISC, por lo que los posibles beneficios tributarios por el uso del SAF serían aprovechados por empresas que requieran el producto y que no sean aerolíneas (entendiendo el Apéndice III de la Ley del IGV, n.d.), como escuelas de aviación o empresas de mensajerías.

Tabla 2. Estimación del factor de nocividad del Jet-A1 y del SAF. Datos de (CDN, 2024; Teoh et al., 2022).

Factor de emisión	Jet-A1	SAF (100%)	Diferencia
E_{NOx}	4.12	~4.12	~0%
E_{CO}	3.85	~3.85	~0%
E_{SO2}	2	~0.2	~90%
E_{PM}	0.03	~0.015	~50%
E_{HCNM}	0.73	~0.73	~0%
FN	<u>15.48</u>	<u>7.83</u>	<u>~49%</u>

1.7.3 Infraestructura aeroportuaria

La infraestructura aeroportuaria del Perú se caracteriza por una red bien distribuida de aeropuertos que conecta tanto las regiones más densamente pobladas como las zonas remotas del país. El principal punto de entrada internacional es el Aeropuerto Internacional Jorge Chávez, ubicado en Lima, que concentra la mayoría del tráfico aéreo internacional y doméstico. Además, ciudades como Cusco, Arequipa, Piura, Iquitos y Trujillo cuentan con aeropuertos que operan vuelos nacionales y, en algunos casos, internacionales limitados, lo que facilita el acceso a destinos turísticos clave y regiones estratégicas para el desarrollo económico.

La Figura 16 muestra la localización geográfica de los principales aeropuertos del país, lo que permite visualizar su distribución en la costa, sierra y Amazonía peruana. Esta red refleja no solo la importancia del transporte aéreo para la integración territorial del Perú, especialmente en zonas de difícil acceso por vía terrestre, sino también el potencial para seguir desarrollando infraestructura aeroportuaria que impulse el turismo, el comercio y la conectividad regional.

³ En Perú la medida estándar para la comercialización de combustibles, son los galones.



Figura 16. Infraestructura aeroportuaria en el Perú (Dunnell, 2018; MapTrove, 2025).

1.7.4 Concurrencia de los aeropuertos

La Tabla 3 muestra el flujo de pasajeros y vuelos entre aeropuertos domésticos en el Perú durante el año 2024. El aeropuerto de Lima es, por mucho, el más ajetreado de los disponibles en el país, lo que refleja su alto grado de centralización del sector de aviación. El segundo aeropuerto más concurrido es el de Cuzco, debido, probablemente, a la alta actividad turística en la región. En lo que respecta a vuelos internacionales, el aeropuerto de Lima ha sido el más concurrido desde el 2018 al 2024, moviendo del 97 al 99% de los pasajeros desde y hacia aeropuertos internacionales (Figura 17).

Tabla 3. Flujo de pasajeros y vuelos entre algunos aeropuertos domésticos en el Perú durante el año 2024. Datos proporcionados por la DGAC.

De / A	Lima	Arequipa	Puerto Maldonado	Ayacucho	Juliaca	Iquitos	Cuzco	Tarapoto	Piura	Trujillo	Chiclayo	Cajamarca	Pucallpa	Tumbes	Tacna	Talara	Otros	Total
Flujo de pasajeros																		
Lima	0	1 042 711	146 884	194 713	307 478	468 168	1 871 302	550 197	542 561	476 590	433 892	337 758	312 145	221 858	220 585	128 362	258 133	7 513 337
Arequipa	1 044 921	0	0	0	2	0	102 594	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	1 147 524
Puerto Maldonado	147 232	0	0	0	0	0	40 331	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	187 564
Ayacucho	202 621	0	0	0	0	0	3 555	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	206 182
Juliaca	289 660	0	0	0	0	0	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	289 681
Iquitos	447 403	0	0	0	0	0	3	20 508	0	0	6 514	0	13 907	0	0	0	0	488 335
Cuzco	1 851 927	108 864	42 525	3 858	0	15	0	0	5	0	0	0	0	0	68	0	0	2 007 262
Tarapoto	545 675	0	0	0	0	21 056	0	0	1	0	11 677	0	4 800	0	0	0	9	583 218
Piura	539 674	0	0	0	0	0	0	7	0	4	0	0	0	0	0	0	0	539 685
Trujillo	465 878	7	0	0	0	0	0	6	1	14	32	153	0	10	0	0	11 336	477 437
Chiclayo	427 775	0	0	0	0	6 690	0	11 809	177	4	2	0	0	0	0	0	0	446 457
Cajamarca	333 603	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	333 604
Pucallpa	306 034	0	1	0	0	14 501	0	4 923	0	1	0	0	0	0	0	0	28	325 488
Tumbes	220 187	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	220 197
Tacna	219 362	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	219 362
Talara	129 297	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	129 297
Otros	262 484	0	0	10	0	0	0	19	0	11 098	0	4	58	0	0	0	8	273 681
Total	7 433 733	1 151 582	189 410	198 581	307 480	510 431	2 017 806	587 469	542 745	487 728	452 117	337 915	330 911	221 868	220 653	128 362	269 520	15 388 311
Flujo de vuelos																		
Lima	0	6 874	1 007	1 383	2 197	2 943	12 803	3 899	3 649	3 339	3 129	2 341	2 428	1 505	1 505	879	3 740	53 621
Arequipa	6 909	0	1	0	1	0	748	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	7 660
Puerto Maldonado	1 006	0	0	0	0	0	290	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1 297
Ayacucho	1 384	0	0	0	0	0	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	1 417
Juliaca	2 202	1	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2 207
Iquitos	3 016	0	0	0	0	0	1	430	1	0	0	0	393	0	0	0	0	3 841
Cuzco	12 795	777	288	27	2	3	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	13 895
Tarapoto	3 925	0	0	0	0	428	0	0	2	4	275	0	328	0	0	0	1	4 963
Piura	3 654	0	0	0	0	0	0	1	1	2	3	0	0	0	0	2	0	3 663
Trujillo	3 330	1	0	0	0	0	0	3	2	3	6	4	0	1	0	0	1 577	4 927
Chiclayo	3 133	0	0	0	0	0	0	254	5	2	1	0	0	0	0	0	0	3 395
Cajamarca	2 345	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2 347
Pucallpa	2 445	0	1	0	0	380	0	326	0	1	0	0	0	0	0	0	6	3 159
Tumbes	1 505	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1 506
Tacna	1 509	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1 509
Talara	881	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	881
Otros	3 743	0	0	4	0	0	0	2	0	1 576	0	1	9	0	0	0	6	5 341
Total	53 782	7 653	1 297	1 414	2 200	3 755	13 873	4 916	3 661	4 930	3 414	2 346	3 159	1 506	1 506	881	5 336	115 629

Al contrastar los datos sobre la afluencia de pasajeros en los aeropuertos del Perú (Tabla 3 y Figura 17) con los volúmenes de consumo de combustible tipo Turbo A-1 (Figura 13), se infiere la existencia de prácticas de *tankering* en el sector aéreo nacional. Específicamente, se observa que muchas aeronaves realizan el abastecimiento casi exclusivo de combustible en el aeropuerto internacional Jorge Chávez, incluso para vuelos de ida y vuelta cuyo destino y origen también es Lima. Se estima que esta estrategia, que consiste en cargar más combustible del necesario para evitar repostar en aeropuertos de destino, genera un consumo adicional estimado entre el 1 % y el 5 %, dependiendo del tipo de aeronave y la distancia del trayecto (Tabernier et al., 2021). A diferencia de lo que ocurre en otros países, donde el *tankering* responde principalmente a diferencias en el precio del combustible, en el caso peruano esta práctica parece estar motivada principalmente por limitaciones en la infraestructura de suministro y distribución de combustible en los aeropuertos regionales.

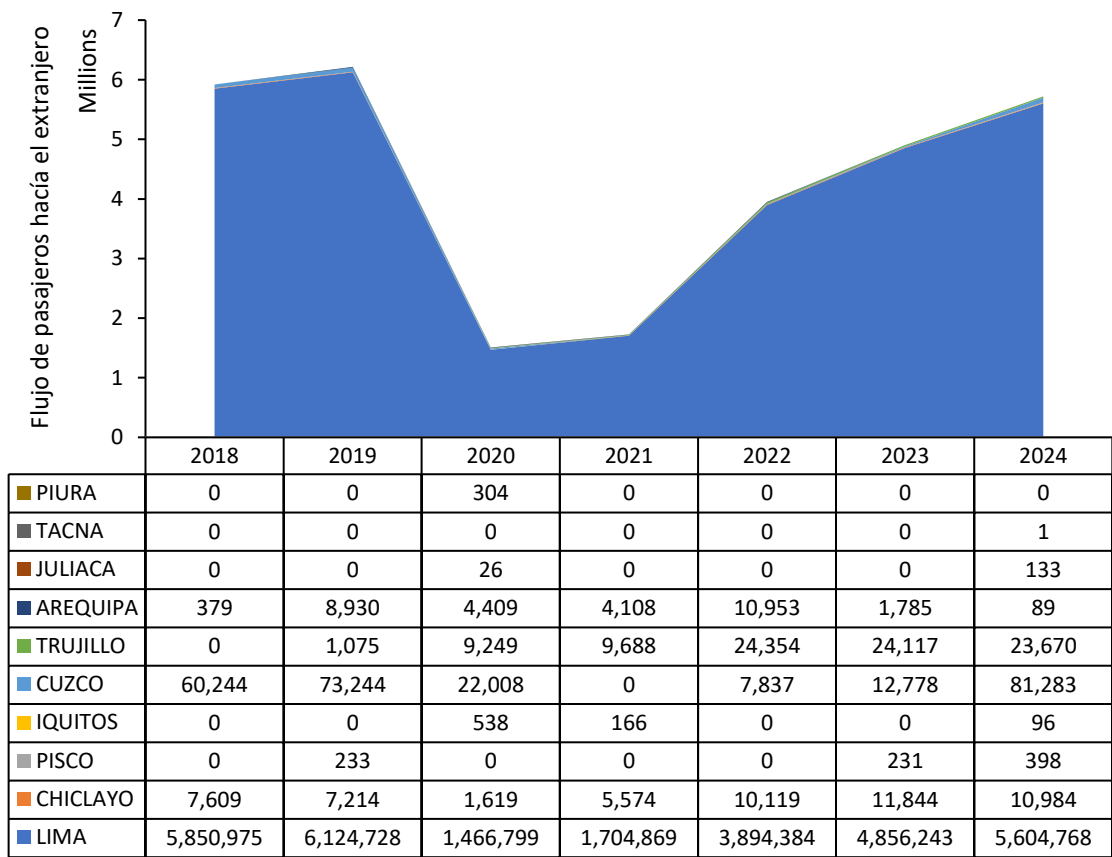


Figura 17. Flujo de pasajeros hacia aeropuertos internacionales desde el Perú en el 2024. Datos proporcionados por la DGAC.

SECCIÓN 2. EVALUACIÓN DE MATERIAS PRIMAS Y VÍAS PARA LA PRODUCCIÓN DE SAF

2.1 PROCESOS DE CONVERSIÓN PARA SAF

En el Anexo 16, Vol. IV de la OACI (estándar de CORSIA), se define un proceso de conversión como "un tipo de tecnología utilizada para convertir una materia prima en combustible de aviación". Los procesos de conversión de SAF son evaluados y aprobados por organizaciones como la ASTM International (ASTM, 2025). Hasta hoy se han aprobado 11 procesos de conversión para la producción de SAF los cuales se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Procesos de conversión aprobados para la producción de SAF.

Referencia ASTM	proceso de conversión	Abreviatura	Posibles materias primas	Proporción máxima de mezcla
ASTM D7566 Anexo A1	Fischer-Tropsch queroseno parafínico sintetizado hidroprocesado	FT	Carbón, gas natural, biomasa	50%
ASTM D7566 Anexo A2	Queroseno parafínico sintetizado a partir de ésteres hidroprocesados y ácidos grasos	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 de la alquilación de aromáticos ligeros de fuentes no petroleras	FT-SKA	Carbón, gas natural, biomasa	50%
ASTM D7566 Anexo A5	Alcohol a queroseno parafínico sintético	ATJ-SP	Etanol, isobutanol e isobuteno a partir de biomasa	50%
ASTM D7566 Anexo A6	Combustible para aviones de hidrotermólisis catalítica	CHJ	Aceites vegetales, grasas animales, aceites de cocina usados	50%
ASTM D7566 Anexo A7	Queroseno parafínico sintetizado a partir de hidrocarburos, ésteres hidroprocesados y ácidos grasos	HC-HEFA-SPK	Algas	10%
ASTM D7566 Anexo A8	Queroseno parafínico sintético con aromáticos	ATJ-SKA	Alcoholes C2-C5 a partir de biomasa	

Referencia ASTM	proceso de conversión	Abreviatura	Posibles materias primas	Proporción máxima de mezcla
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 de Fischer-Tropsch coprocesados con petróleo	5%
ASTM D1655 Anexo A1	Coprocesamiento de HEFA	—	Ésteres hidroprocesados/ácidos grasos de biomasa	10%

Para ser elegible para su uso dentro del esquema CORSIA de la OACI, el combustible sintético también debe cumplir con un conjunto de criterios de sostenibilidad disponibles en la página web de la OACI dedicada a los combustibles elegibles para CORSIA (ICAO, 2025a). El Anexo A3 muestra un resumen de los criterios de sostenibilidad de la OACI.

La Tabla 5 muestra varios procesos de conversión que actualmente están siendo evaluados por la ASTM. Asimismo, también se está trabajando para permitir el uso de 100% de SAF en aviones, así como para aumentar la mezcla máxima para el coprocesamiento del 5% al 30%. En lo que respecta a la inclusión de nuevas materias primas potenciales, se está desarrollando un protocolo de evaluación general para facilitar su aprobación para el coprocesamiento bajo la ASTM D4054.

Tabla 5. Procesos de conversión de SAF en proceso de aprobación.

Proceso de conversión en evaluación	Abreviatura	Desarrolladores principales
Queroseno aromático sintetizado	SKA	Virent
Hidropirólisis e hidroconversión integradas	IH2	Shell
HEFA de reactor único (combustible líquido sostenible para la aviación y el automóvil)	DILSAAF	Indian CSIR-IIP
Pirólisis de plásticos no reciclables	ReOIL	OMV
Coprocesamiento de aceite de pirólisis de neumáticos usados	TPO	Philips 66
Metanol a jet	MTJ	ExxonMobil
Aumento del coprocesamiento de ácidos grasos/ésteres del 5% al 30%	—	—
HEFA con alto contenido de cicloparafinas	—	Revo
Pirólisis de biomasa	—	Alder
Pirólisis de biomasa/residuos	—	Green Lizard
Cicloalcanos a partir de etanol	—	Vertimass

2.2 EVALUACIÓN GENERAL DE LAS MATERIAS PRIMAS

2.2.1 Metodología

La Figura 18 resume la metodología para la evaluación general de las materias primas con potencial para la producción de SAF en el Perú, la cual involucró: una búsqueda de información, una estimación del potencial de SAF, una estimación de emisiones de GEI del SAF, la evaluación económica de las diferentes rutas de conversión y una evaluación cualitativa.

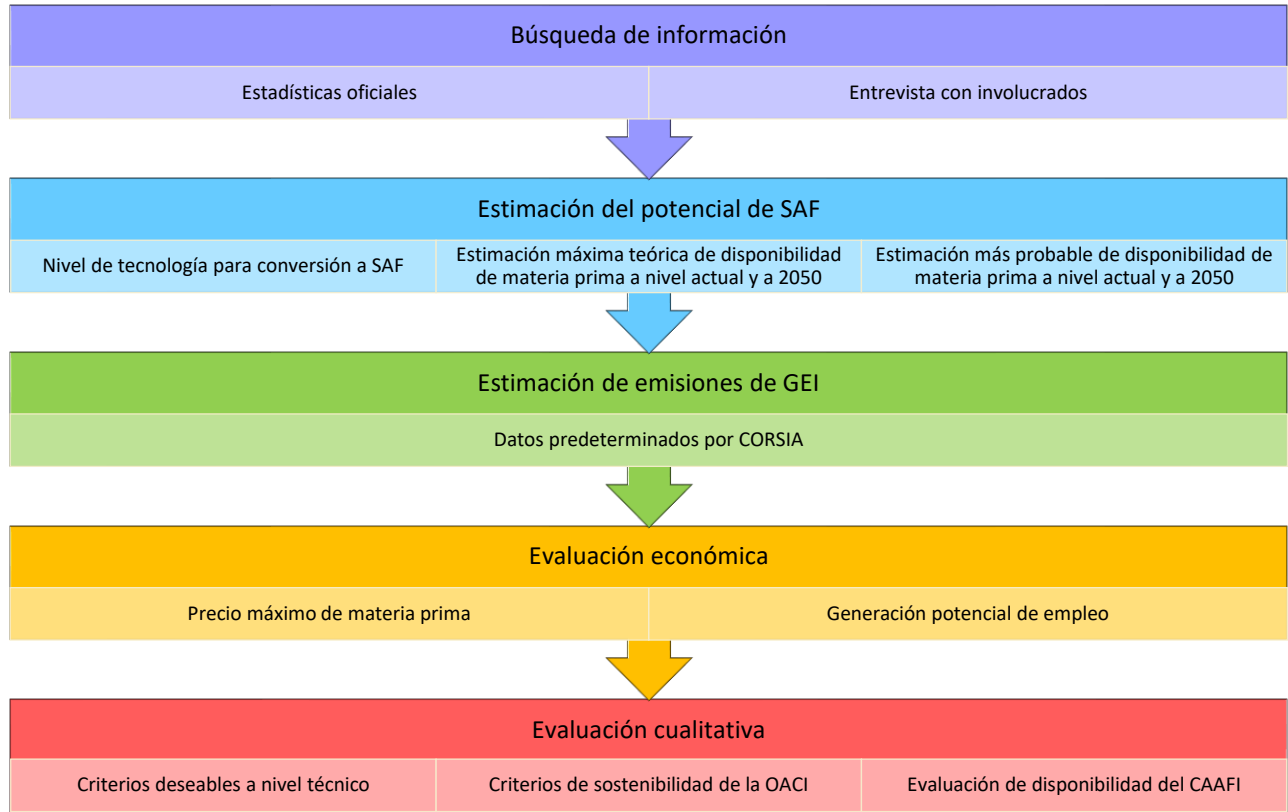


Figura 18. Metodología para la evaluación general de las materias primas con potencial para la producción de SAF.

El cálculo del potencial de producción de SAF en el Perú consideró una estimación de la disponibilidad de las materias primas adecuadas a niveles actuales y a 2050. Las proyecciones a 2050 se realizaron mediante una regresión lineal considerando las tendencias históricas. Por otra parte, se consideró un potencial máximo teórico y más probable de SAF. El primero asume altas tasas de conversión de SAF, una alta productividad de materia prima y una recolección y transformación completa de las mismas. En contraste, el potencial más probable asumió limitaciones en estos aspectos. Dadas las limitantes de información, las emisiones de GEI de las rutas de conversión de SAF fueron estimadas a partir de los factores predeterminados por CORSIA (ICAO, 2021).

La evaluación económica de cada ruta de conversión consiste en la estimación del precio máximo que la materia prima potencial debería tener para que el Precio Mínimo de Venta (PMV) del SAF resultante sea competitivo en el mercado, es decir, sea igual al del Jet-A1 en Lima (Figura 15), o al del SAF a nivel internacional que, para fines de este estudio, se asumió en los USD 2 por litro (PEN 26.72/gal) (Wardejn, 2025). Asimismo, se asumió una tasa de descuento del 10% en un periodo de evaluación de 5, 10, 15 o 20

años. El cálculo de los precios de las materias primas se realizó usando las herramientas desarrolladas por expertos de la Washington State University y de la Universidad de Hasselt, adaptándolas a los criterios de este estudio y a las condiciones del Perú (ver detalles en el Anexo A7) (Eswaran et al., 2021). La intención de estas estimaciones es mostrar una visión muy general de la situación del sistema actual y no proveer resultados precisos. Por lo tanto, las decisiones de inversión o políticas deben basarse en un análisis específico que capture detalles específicos relacionados con la inversión o la política (ICAO, 2022).

La evaluación económica también incluyó la estimación de los empleos directos e indirectos potenciales derivados de la producción de SAF. Los empleos directos implican el cultivo y/o recolección de la materia prima, así como su transformación en SAF. Los primeros son estimados a partir de factores de generación de empleo reportados por los involucrados o en la bibliografía consultada. Por otra parte, los segundos fueron estimados mediante modelos aplicables para la producción de biocombustibles (Cuevas-Castillo et al., 2024). La Tabla 6 resume las ecuaciones para el cálculo de la generación de empleos potenciales por la producción de SAF. Las ecuaciones 3 y 4 son de estimación propia y la 5 de la referencia indicada en el párrafo anterior.

Tabla 6. Ecuaciones para el cálculo de la generación de empleos potenciales por la producción de SAF.

Eq.	Fórmula	Abreviaciones
(3)	$GE = GE_D + GE_I$	<ul style="list-style-type: none"> • GE, generación de empleo • GE_D, generación de empleos directos • GE_I, generación de empleos indirectos
(4)	$GE_D = GE_{D,C/R} + GE_{D,T}$	<ul style="list-style-type: none"> • $GE_{D,C/R}$, generación de empleos directos por cultivo y/o recolección de materia prima • $GE_{D,T}$, generación de empleos directos por la transformación de la materia prima en SAF
(5)	$GE_{D,T} = 2.13 \times \left(\frac{Q_p}{JL}\right)^{0.242} \times n_p \times \frac{JL}{24}$	<ul style="list-style-type: none"> • Q_p, capacidad de producción de la instalación [kg SAF/año]. Se toma como el potencial máximo teórico o más probable de SAF • n_p, número de procesos involucrados en la producción. Se asume en 1 • JL, jornada laboral [horas/año]. Se asume en 7 884 horas/año

Finalmente, la evaluación cualitativa consideró ciertos criterios deseables para la materia prima potencial, un análisis preliminar de los criterios de la sostenibilidad definidos por la OACI (ICAO, 2025a) y la evaluación de disponibilidad establecida por la Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative (CAAFI, 2025) de los Estados Unidos de América. Los criterios deseables a nivel técnico son propuestos por el autor, asumiendo que su cumplimiento facilitaría los requerimientos de la recolección, transporte y transformación de materias primas. El Anexo A2 muestra una descripción más detallada de estos criterios. Asimismo, los criterios de sostenibilidad definidos por la OACI se resumen en el Anexo A3.

2.2.2 Resultados

La Tabla 7 resume los resultados de la evaluación de la producción potencial de SAF en el Perú. Los resultados indican que, a niveles actuales, el Perú cuenta con un máximo potencial teórico de alrededor de 16 Mt de SAF que ascenderían a 29.5 Mt si se incluyen los potenciales de sorgo cultivado en suelos áridos. Dichas cantidades son suficientes para suplir las necesidades internas de combustibles de aviación y generar un superávit para exportación, considerando un consumo actual de alrededor de 1 Mt de Jet-A1 (Figura 13).

Tabla 7. Resultados de la evaluación de la producción potencial de SAF en el Perú a partir de diversas materias primas.

Parámetro	Residuos sólidos urbanos	Residuos agrícolas	Sinergia con el etanol de caña de azúcar	Transición del biodiésel de aceites vegetales	Aceite de palma	Aceites y grasas residuales	Sorgo	Residuos pecuarios	Gases de chimenea
Estimación del potencial de SAF									
Tecnología									
Tecnología de conversión a SAF	FT	FT	ATJ	HEFA o coprocesado	HEFA o coprocesado	HEFA o coprocesado	ATJ	FT	PTL
Disponibilidad de la tecnología	TRL8	TRL8	TRL7-8	TRL9	TRL9	TRL9	TRL7-8	TRL8	TRL7-8
Potencial de SAF a nivel actual^a									
Potencial máximo teórico de SAF [kt/a]	869	6 526	120	149	115	213	13 648	3 962	3 872
Contribución máxima teórica al consumo de Jet-A1 [% p/p] ^b	87%	651%	12%	15%	11%	21%	1362%	396%	387%
Número de instalaciones requeridas	6	65	1	1	1	1	24	40	24
Inversión requerida (millones de USD)	USD 8 568	USD 98 085	USD 328	USD 456	USD 456	USD 448	USD 7 872	USD 60 360	USD 80 784
Potencial más probable de SAF [kt/a]	117	576	55	76	58	0.14	53	117	160
Contribución más probable al consumo de Jet-A1 [% p/p] ^b	11.70%	57.52%	5.45%	7.55%	5.82%	0.014%	5.29%	11.70%	15.97%
Número de instalaciones requeridas	1	6	1	1	1	1	1	2	1
Inversión requerida (millones de USD)	USD 1 428	USD 9 054	USD 328	USD 456	USD 456	USD 448	USD 328	USD 3 018	USD 3 366
Incertidumbre en la estimación	Baja	Media	Media	Media	Media	Alta	Alta	Media	Media
Potencial de SAF a 2050^a									
Potencial máximo teórico de SAF [kt/a]	1 514	19 453	181	609	444	292	13 648	4 962	6 943
Contribución máxima teórica al consumo de Jet-A1 [% p/p] ^b	31%	402%	4%	13%	9%	6%	282%	103%	143%
Número de instalaciones requeridas	10	105	1	2	1	1	24	50	42
Inversión requerida (millones de USD)	USD 14 280	USD 158 445	USD 328	USD 912	USD 456	USD 448	USD 7 872	USD 75 450	USD 141 372
Potencial más probable de SAF [kt/a]	165	12 969	58	309	226	0.18	75.25	138	243
Contribución más probable al consumo de Jet-A1 [% p/p] ^b	3.41%	267.95%	1.21%	6.39%	4.66%	0.004%	1.5548%	2.86%	5.01%

Parámetro	Residuos sólidos urbanos	Residuos agrícolas	Sinergia con el etanol de caña de azúcar	Transición del biodiésel de aceites vegetales	Aceite de palma	Aceites y grasas residuales	Sorgo	Residuos pecuarios	Gases de chimenea
Número de instalaciones requeridas	1	70	1	1	1	1	1	2	2
Inversión requerida (millones de USD)	USD 1 428	USD 105 630	USD 328	USD 456	USD 456	USD 448	USD 328	USD 3 018	USD 6 732
Emisiones de GEI									
Factor de emisión de GEI [g CO _{2eq} /MJ]	113.35	7.7	41	47.4	25.7	13.9	64.6	5.2	42.40
Potencial de mitigación de GEI	-27%	91%	54%	47%	71%	84%	27%	94%	52%
Evaluación económica									
Precio máximo de la materia prima para equipar el precio de SAF al precio del Jet-A1 en Lima [PEN/t]^c									
Evaluación a 20 años	PEN 132 (USD 38)	PEN 294 (USD 83)	PEN 2 120 (USD 601)	PEN 3 488 (USD 988)	PEN 3 488 (USD 988)	PEN 3 488 (USD 988)	PEN 2 120 (USD 601)	PEN 132 (USD 38)	Sin datos
Evaluación a 15 años	PEN 79 (USD 22)	PEN 234 (USD 66)	PEN 2 034 (USD 576)	PEN 3 403 (USD 964)	PEN 3 403 (USD 964)	PEN 3 403 (USD 964)	PEN 2 034 (USD 576)	PEN 79 (USD 22)	Sin datos
Evaluación a 10 años	-PEN 37 (-USD 10)	PEN 106 (USD 30)	PEN 1 889 (USD 535)	PEN 3 250 (USD 921)	PEN 3 250 (USD 921)	PEN 3 250 (USD 921)	PEN 1 889 (USD 535)	-PEN 37 (-USD 10)	Sin datos
Evaluación a 5 años	-PEN 169 (-USD 48)	-PEN 44 (-USD 13)	PEN 1 645 (USD 466)	PEN 2 978 (USD 843)	PEN 2 978 (USD 843)	PEN 2 978 (USD 843)	PEN 1 645 (USD 466)	-PEN 169 (-USD 48)	Sin datos
Precio máximo de la materia prima para equipar el precio de SAF a su precio internacional [PEN/t]^c									
Evaluación a 20 años	PEN 735 (USD 208)	PEN 1 055 (USD 299)	PEN 3 766 (USD 1 067)	PEN 5 994 (USD 1 698)	PEN 5 994 (USD 1 698)	PEN 5 994 (USD 1 698)	PEN 3 766 (USD 1 067)	PEN 735 (USD 208)	Sin datos
Evaluación a 15 años	PEN 674 (USD 191)	PEN 986 (USD 279)	PEN 3 644 (USD 1 032)	PEN 5 878 (USD 1 665)	PEN 5 878 (USD 1 665)	PEN 5 878 (USD 1 665)	PEN 3 644 (USD 1 032)	PEN 674 (USD 191)	Sin datos
Evaluación a 10 años	PEN 547 (USD 155)	PEN 843 (USD 239)	PEN 3 443 (USD 975)	PEN 5 675 (USD 1 608)	PEN 5 675 (USD 1 608)	PEN 5 675 (USD 1 608)	PEN 3 443 (USD 975)	PEN 547 (USD 155)	Sin datos
Evaluación a 5 años	PEN 385 (USD 109)	PEN 656 (USD 186)	PEN 3 076 (USD 871)	PEN 5 282 (USD 1 496)	PEN 5 282 (USD 1 496)	PEN 5 282 (USD 1 496)	PEN 3 076 (USD 871)	PEN 385 (USD 109)	Sin datos
Generación de empleo a 2050 bajo proyección máxima teórica									
Empleos directos	26 226	266 916	42 318	611	59 993	294	Sin datos	39 884	8
Empleos indirectos	Sin datos	Sin datos	64 111	Sin datos	89 983	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
Empleos totales	>26 226	>266 916	106 429	>611	149 976	>294	Sin datos	>39 884	>8
Generación de empleo a 2050 bajo proyección más probable									
Empleos directos	2 862	177 946	13 665	312	59 993	2	Sin datos	1 114	4
Empleos indirectos	Sin datos	Sin datos	20 699	Sin datos	89 983	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
Empleos totales	>2 862	>177 946	34 364	>312	149 976	>2	Sin datos	>1 114	>4
Evaluación cualitativa									

Parámetro	Residuos sólidos urbanos	Residuos agrícolas	Sinergia con el etanol de caña de azúcar	Transición del biodiésel de aceites vegetales	Aceite de palma	Aceites y grasas residuales	Sorgo	Residuos pecuarios	Gases de chimenea
Criterios deseables a nivel técnico^d									
Producción centralizada	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓
Homogeneidad	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓
Estacionalidad	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓
En desuso	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✓	✓
Precio	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓
Técnicamente factible	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Factibilidad económica	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇
Criterios de sostenibilidad^{d, e}									
Emisiones de GEI									
Reducción de GEI	◇ ^g	✓	✓	✓	✓	✓	◇	✓	✓
Stock de carbono	✓	✓	◇	✓	◇	✓	◇	✓	✓
Permanencia en la reducción de emisiones de GEI	✓	✓	✓	✓	✓	✓	◇	✓	✓
Otros criterios ambientales									
Uso del agua / Calidad del agua	✓	✓	◇	✓	◇	✓	✓	✓	✓
Conservación del suelo	✓	✓	◇	✓	◇	✓	✓	✓	✓
Contaminación del aire	✓	✓	◇	✓	◇	✓	✓	✓	✓
Biodiversidad y conservación	✓	✓	◇	✓	◇	✓	✓	✓	✓
Residuos químicos	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Impactos sísmicos y vibracionales	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Criterios socioeconómicos^d									
Derechos humanos y laborales	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Derechos sobre la tierra	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Derechos de uso del agua comunitaria	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Desarrollo local y social	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Seguridad alimentaria	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Evaluación de disponibilidad de materia prima^{d, f}									
Producción	5.2	5.1	8	8	8	4.2	5.1	5.1	5.1
Mercado	4.1	3.1	4.1	4.1	4.1	4.3	3.1	3.2	4.3
Política	4.4	4.4	6.2	6.2	6.2	5.3	4.4	4.4	4.1
Confiabilidad y resiliencia	2.4	2.2	4.4	4.4	4.4	4.4	2.2	2.4	3.1
Vínculo a conversión	9	9	9	9	9	9	9	9	9

^a Considerando el consumo de Jet-A1 en Perú en 2024 (Figura 13) y las proyecciones a 2050 (Figura 14).

^b La notación [% p/p] hace referencia a porcentaje peso a peso.

^c Precio máximo al que se tendría que adquirir la materia prima para que el precio del SAF sea competitivo (igual al precio del Jet-A1 en Lima) [PEN 16.91/gal (USD 4.79) para 2024 (Figura 15) o al precio internacional del SAF [PEN 26.72/gal (USD 7.57/gal)] y se obtenga una tasa de descuento del 10% durante el periodo de evaluación. Otros supuestos para el cálculo se muestran en el apéndice A7. Los datos en paréntesis son el equivalente de dólares americanos.

^d ✓ Valoración favorable; ✗ Valoración desfavorable; ◇ Requiere análisis para poder valorar.

^e Criterios de sostenibilidad definidos por la OACI (ICAO, 2025a) y descritos con más detalle en el anexo A3.

^f Criterios de evaluación de disponibilidad definidos por CAAFI (CAAFI, 2025).

^g El potencial de mitigación depende del contenido de plásticos en los RSU, el cual debe ser inferior al 49%. La sección 0 muestra más detalle al respecto.

Si se tomasen en cuenta las rutas más probables que se den a corto plazo, es decir, aquellas que incluyen la sinergia de etanol de caña de azúcar, la transición de biodiésel de aceites vegetales o el aprovechamiento de aceites residuales, la producción estimada de SAF sería suficiente para cubrir las necesidades del Jet-A1 en un 13%.

Para 2050, el potencial máximo teórico nacional asciende a aproximadamente 39 Mt de SAF, lo que equivale a casi 8 veces el consumo proyectado de Jet-A1 al 2050. Sin embargo, el potencial más probable (que considera restricciones técnicas, logísticas y de recolección) se reduce a alrededor de 8 Mt, cubriendo 1.7 veces la demanda nacional de combustible de aviación proyectada para ese año. Esta diferencia sustancial entre el potencial teórico y el realizable evidencia la influencia de factores como la eficiencia de conversión, la dispersión geográfica de los recursos, la competitividad frente a otros usos y la limitada infraestructura de acopio.

Entre las materias primas evaluadas, los residuos agrícolas y el sorgo destacan como las opciones con mayor contribución potencial, tanto en escenarios teóricos como probables. Los residuos sólidos urbanos (RSU) también representan una alternativa relevante. No obstante, su aprovechamiento efectivo depende de una mejora sustancial en las tasas de recolección y segregación. En contraste, las rutas asociadas a aceites vegetales, grasas residuales y aceites de palma presentan menores potenciales de expansión debido a limitaciones en la oferta y a la competencia con usos alimentarios, aunque su madurez tecnológica (TRL 9) las convierte en candidatas estratégicas para fases iniciales de implementación mediante coprocesado en refinerías.

Desde una perspectiva ambiental, los factores de emisión varían ampliamente entre rutas. Los residuos agrícolas y pecuarios muestran los menores factores de GEI (7.7 y 5.2 g CO₂eq/MJ, respectivamente), con reducciones superiores al 90% respecto al Jet-A1, mientras que los RSU presentan emisiones netas positivas (113 g CO₂eq/MJ), atribuibles a su fracción de carbono no biogénico (contenido de plásticos).

En cuanto a la viabilidad económica, los precios máximos de materia prima que permitirían la competitividad del SAF respecto al Jet-A1 varían entre PEN 132 (≈USD 38) por tonelada para residuos sólidos urbanos y PEN 2 200 (≈USD 623) por tonelada para alcoholes bajo un periodo de evaluación de 20 años. Dichas restricciones disminuyen conforme se reducen los periodos de evaluación. En el mercado internacional, el precio internacional del SAF permitiría mayores precios máximos para las materias primas evaluadas.

El potencial de generación de empleo al 2050 es significativo. En el escenario máximo teórico se estiman alrededor de 436 mil y 154 mil empleos indirectos e indirectos, respectivamente, con predominio en la valorización de residuos agrícolas (más de 267 mil empleos directos) y en la transición de etanol de caña (más de 42 mil empleos directos y 64 mil indirectos). Aun bajo el escenario más probable, la contribución supera los 366 mil empleos totales, lo que posiciona al SAF como un vector relevante para la diversificación productiva rural y la generación de valor agregado local.

Finalmente, la evaluación multicriterio incluida en la tabla evidencia que las rutas basadas en residuos agrícolas, RSU y aceites residuales ofrecen el mejor balance entre disponibilidad, sostenibilidad y factibilidad técnica. En cambio, los biocombustibles derivados de cultivos dedicados o aceites vírgenes presentan mayores riesgos en términos de competencia por la tierra y sostenibilidad ambiental. De manera general, el análisis confirma que el éxito del desarrollo de SAF en el Perú dependerá de combinar rutas de corto plazo basadas en tecnologías maduras (HEFA, coprocesado) con rutas de mediano plazo centradas en residuos

agrícolas y urbanos, apoyadas por políticas integradas de economía circular, gestión de residuos y descarbonización del transporte.

Las siguientes secciones muestran en detalle los supuestos y la discusión en torno a la producción potencial de SAF de las diversas materias primas analizadas.

2.3 EVALUACIÓN POR MATERIA PRIMA

2.3.1 Residuos sólidos urbanos (RSU)

Disponibilidad de la materia prima

La Figura 19 muestra la distribución de la generación de residuos sólidos urbanos (RSU) en el Perú durante el año 2023, los cuales son clasificados en orgánicos, plásticos y no aptos para combustibles (metales, cerámicos, vidrio, entre otros). Los residuos orgánicos incluyen alimentos, malezas, papel, cartón, textiles y cauchos. Por otra parte, los residuos plásticos incluyen reciclables y de un solo uso. En el 2023, el país generó 8 706 kt de residuos, lo que supone aproximadamente 0.86 kg de RSU per cápita. Aproximadamente el 61% de estos residuos son dispuestos adecuadamente a lo largo de 223 municipalidades (MINAM, 2024).

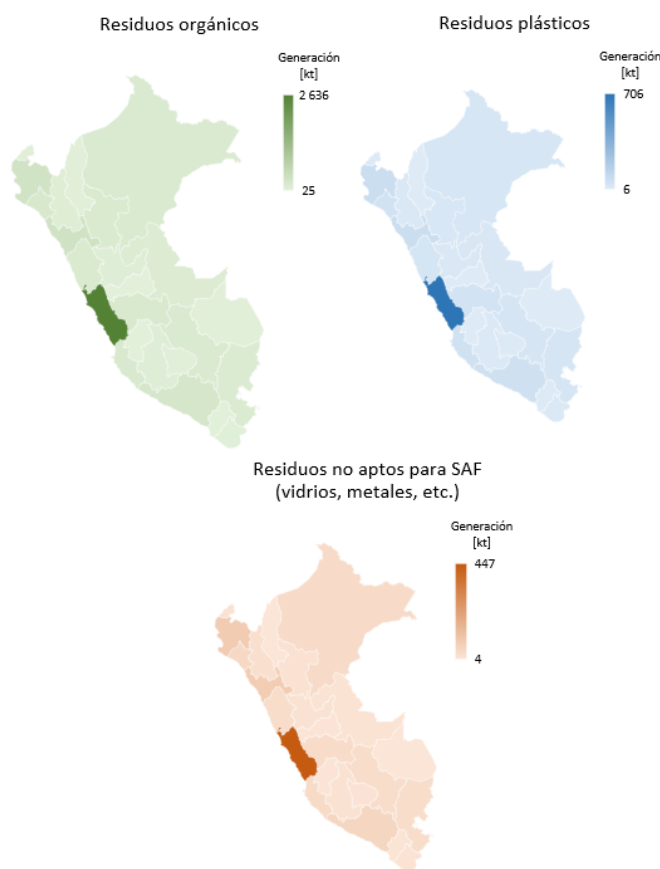


Figura 19. Generación de residuos en el Perú en 2023. Datos proporcionados por el MINAM. El contenido de plásticos en el RSU destinado para la producción de SAF debe ser menor al 44% para cumplir con el requerimiento de emisiones de GEI.

La producción de SAF a partir de RSU puede realizarse mediante la ruta de gasificación por Fischer-Tropsch (FT) y se estima considerando el poder calorífico inferior del residuo, su contenido de humedad y la eficiencia de transformación, tal como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Fórmulas aplicadas en este estudio (cálculo propio) para la estimación de la producción potencial de SAF a partir de RSU.

Eq.	Fórmula	Abreviaciones
(6)	$Q_{SAF,RSU} = \frac{E_{ff,RSU} \times \sum [Q_{r,i} \times (1 - H_{r,i}) \times PCI_{RSU,i}]}{PCI_{SAF}}$	<ul style="list-style-type: none"> • $Q_{SAF,RSU}$, la cantidad estimada de SAF a partir de RSU [kt]. • $E_{ff,RSU}$, la eficiencia de transformación de RSU a SAF [MJ/MJ]. Se asume en 0.54 MJ/MJ. • $Q_{r,i}$, cantidad del i-ésimo RSU susceptible para la producción de SAF [kt]. • $H_{r,i}$, humedad del i-ésimo RSU susceptible para la producción de SAF [%] (ver anexo A4). • $PCI_{RSU,i}$, poder calorífico inferior del i-ésimo RSU susceptible para la producción de SAF [MJ/kt] (ver anexo A4). • PCI_{SAF}, poder calorífico inferior del SAF [MJ/kt]. Se asume un valor de 42.8 MJ/kg (Boehm et al., 2022).

Los detalles en torno a la composición del RSU, contenido de humedad y poder calorífico se encuentran en el Anexo A4. Por mucho, Lima es el estado que más genera RSU y, por tanto, aquel que cuenta con un mayor potencial para la producción de SAF (45%), seguido por Piura (6%) y La Libertad (6%). La fracción orgánica, oscila entre un 38% y un 54%, dependiendo del estado, con promedio ponderado del 45%, mientras que la fracción plástica oscila entre un 46% y un 62%, con un promedio ponderado del 55%.

En general, la producción máxima potencial de SAF a partir de RSU en el Perú asciende a 869 kt/año bajo los niveles actuales de generación de residuos. Esta cifra bajaría en un 39% (alcanzando los 530.09 kt de SAF) asumiendo que solo los residuos dispuestos adecuadamente serían aprovechables. Sin embargo, considerando los índices actuales de valoración de residuos, se espera que esta cifra baje a 10.81 kt y 18.76 kt de SAF a partir de RSU orgánicos e inorgánicos, respectivamente, alcanzando un potencial más probable de 29.57 kt de SAF con un contenido de carbono no biogénico del 63.43%.

La Figura 20 muestra la proyección de la generación de RSU en el Perú considerando los datos históricos desde 2019 a 2023 (MINAM, 2024), asumiendo que no hay factores políticos o económicos que afecten significativamente su tendencia de crecimiento. Bajo estos supuestos, se estima que la generación de RSU para 2030, 2040 y 2050 ascienda a 10.37 Mt, 12.77 Mt y 15.17 Mt, lo que potencialmente podría permitir una producción máxima de SAF a partir de su uso, de 1 035 kt, 1 275 kt y 1 514 kt, respectivamente. Sin embargo, bajo los niveles actuales de aprovechamiento de RSU, la producción potencial de SAF descendería a los 35 kt, 43 kt y 52 kt para esos años, respectivamente, lo que está por debajo de la capacidad instalada de referencia para plantas de aprovechamiento de RSU, es decir, 1 175 kt/a de RSU (que generarían 148 kt/a de SAF). Esta capacidad corresponde al 13.5% del RSU generado en el Perú o al 31% del generado en Lima en el 2023, la cual sería la más probable para ser aprovechada para la producción de SAF.

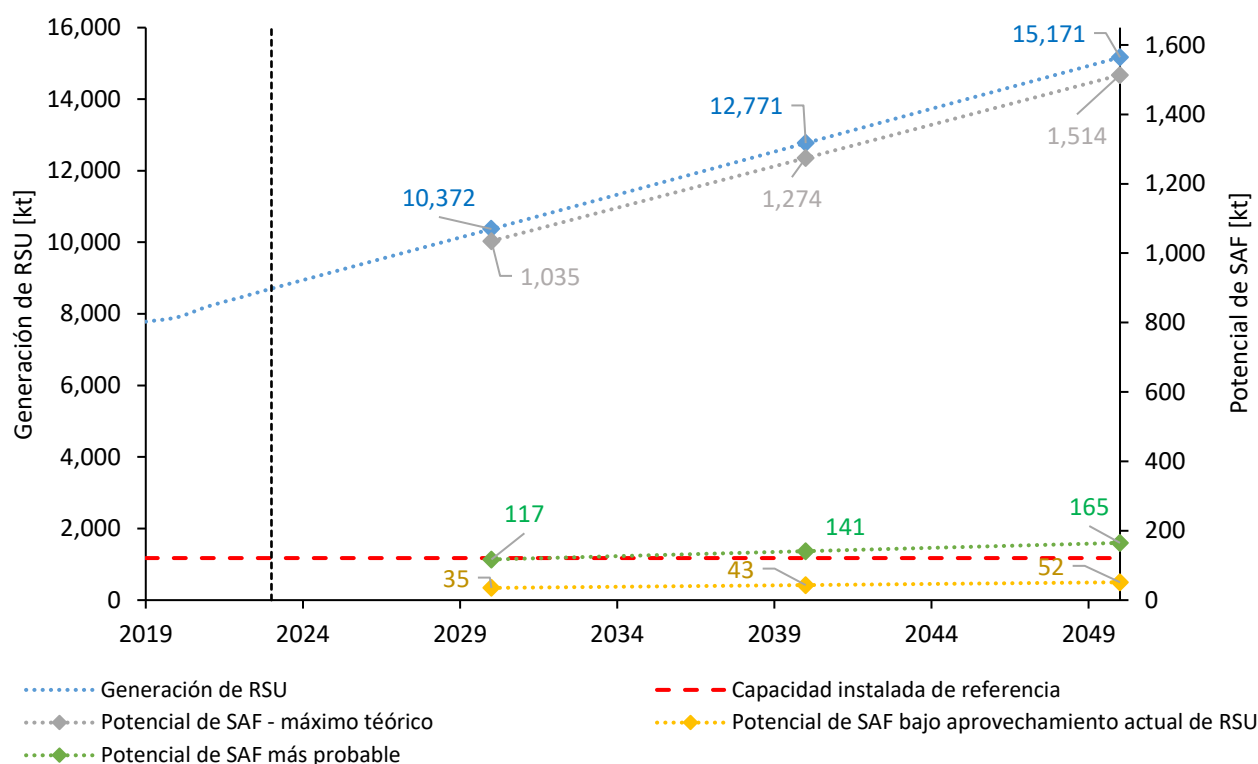


Figura 20. Proyección de la producción potencial de SAF en el Perú a partir de RSU.

Factores de sostenibilidad

Emisiones de GEI

Para los materiales clasificados como coproductos, residuos, desechos o subproductos según la metodología CORSIA de la OACI (documento “*Metodología CORSIA para el cálculo de los valores reales de emisiones del ciclo de vida*”), se asume que no se generan emisiones durante la producción de materia prima. Sin embargo, se incluirán las emisiones generadas durante la recolección, recuperación, extracción y procesamiento de estos desechos, residuos y subproductos.

Adicionalmente, a los SAF producidos a partir de desechos, residuos y subproductos se les asigna un valor de Cambio Indirecto del Uso de la Tierra (ILUC) de cero. Esto significa que no se atribuyen emisiones a estas materias primas en el cálculo del ILUC. Las emisiones de CO₂ derivadas del aprovechamiento de RSU dependen de su fracción de CO₂ no biogénico de acuerdo con la ecuación que se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Fórmulas aplicadas en este estudio (cálculo propio) para la estimación de la producción potencial de SAF a partir de residuos agrícolas (ICAO, 2021).

Eq.	Fórmula	Abreviaciones
(7)	$GHG_{SAF,RSU} = 170.5 * FCNB + 5.2$	<ul style="list-style-type: none"> • $Q_{SAF,RSU}$, emisiones de ciclo de vida de GEI de la producción y uso de SAF a partir de RSU [g CO_{2eq}/MJ]. • $FCNB$, fracción de carbono no biogénico en el RSU [—].

Dado el alto contenido de plásticos en los RSU del Perú, el factor de emisión de GEI del SAF a partir de RSU se estima en 113.35 g CO₂eq/MJ. Lo que no cumple con los requerimientos de reducción de emisiones de GEI establecidos por CORSIA. Por tanto, la producción de SAF a partir de RSU en el Perú debería concentrarse únicamente en el aprovechamiento de su fracción orgánica, alcanzando 29.57 kt de SAF con emisiones de 5.2 gCO₂eq/MJ (con un potencial de mitigación de GEI del 94.15%). Otra opción es realizar mezclas de RSU orgánicos y plásticos, pero con un máximo del 43.93% del último para alcanzar los mínimos requerimientos de mitigación de GEI, alcanzando un potencial de SAF de 52.74 kt.

Otros aspectos ambientales

No se espera que el aprovechamiento de los RSU para la producción de SAF implique incidencias en el uso o calidad del agua, el uso del suelo, la contaminación del aire o la biodiversidad. Asimismo, aquellos emprendedores que quieran aprovechar los RSU deben asegurarse de que las nuevas instalaciones no generen (o minimicen) residuos químicos peligrosos o impactos sísmicos o vibracionales.

Los SAF producidos a partir de RSU pueden generar créditos de emisiones, en particular a través del marco CORSIA de la OACI, que reconoce las reducciones de emisiones por créditos de Emisiones de Vertederos Evitadas (LEC), o por créditos de Emisiones de Reciclaje Adicionales (REC).

Aspectos socioeconómicos

Aquellos emprendedores que quieran aprovechar los RSU para la producción de SAF deben asegurarse de cumplir los requerimientos socioeconómicos establecidos por la OACI (ver Anexo A3). No se espera que esta ruta de conversión implique incidencias en derechos sobre tierras, uso de agua comunitario o la seguridad alimentaria. De hecho, la recolección y transformación de RSU puede mejorar aspectos sociales como el paisaje comunitario y generar empleos.

Factores económicos

La Figura 21 muestra una estimación del PMV del SAF en función del precio de recolección del residuo, así como el precio máximo del residuo en función del periodo de evaluación después de haber construido la instalación (3 años). De acuerdo con el análisis, el costo de recolección del residuo debe ser menor a los PEN 133/t (≈USD 38/t) para que el PMV del SAF sea menor al precio del Jet-A1 en aeropuertos bajo un periodo de evaluación de 20 años y asumiendo una tasa de rentabilidad del 10% sobre la inversión. Si se desea obtener rendimientos económicos similares en un periodo de evaluación de 15 años, el costo de recolección del residuo debe descender a PEN 78/t (≈USD 22/t). Periodos de evaluación cortos a los 11 años implicarían un precio del SAF más alto que el del Jet-A1 en Lima, independientemente del costo de recolección del residuo, a menos que se logre crear un modelo de negocio en el cual sea posible obtener ingresos por la recolección del RSU. En cuyo caso, se deberían obtener ingresos de PEN 37/t (≈USD 11/t) de RSU bajo periodos de evaluación de 10 años o de PEN 169/t (≈USD 48/t) de RSU en periodos de evaluación de 5 años. Si se toma como valor de referencia el precio internacional del SAF, se tendría un mayor margen de los costos máximos de recolección, alcanzando los PEN 385/t (USD 109/t), PEN 547/t (USD 155/t), PEN 674/t (USD 191/t) y PEN 735/t (USD 208/t) durante periodos de evaluación de 5, 10, 15 y 20 años, respectivamente.

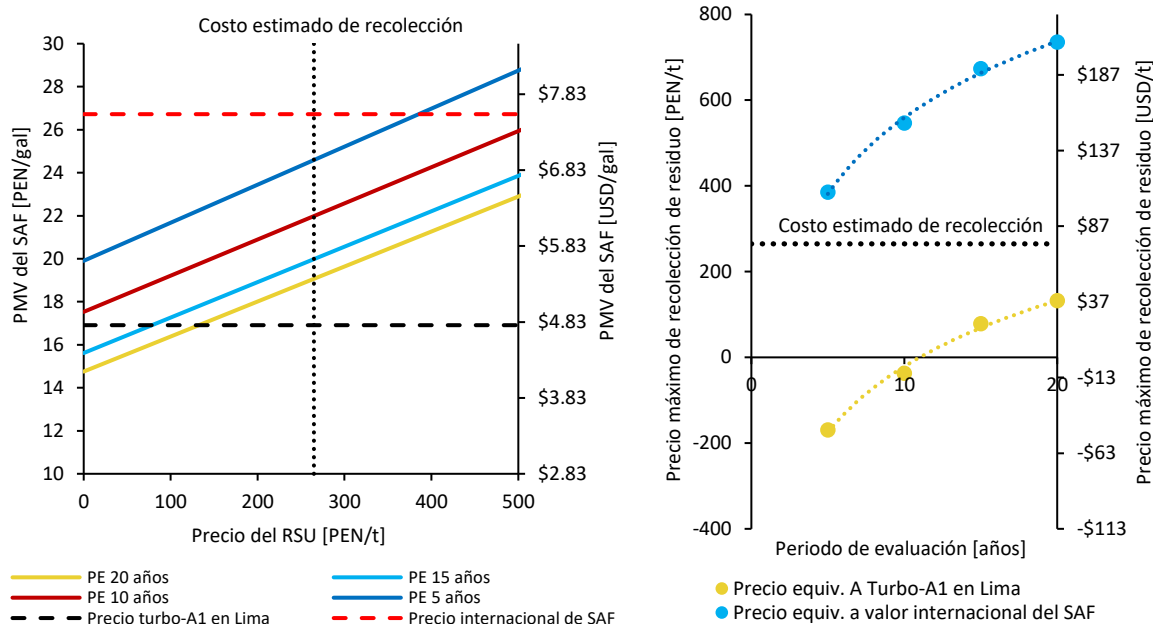


Figura 21. Estimación del PMV del SAF en función del precio del RSU (izquierda) y precio máximo de recolección del residuo para que el SAF alcance un PMV igual al del Jet-A1 en Lima (derecha). No se incluyen impuestos, otras tarifas o costos de distribución. PE, periodo de evaluación (excluyen los años de la construcción de la instalación. Los supuestos en torno a la evaluación se muestran en el Anexo A7.

Considerando datos proporcionados por el MINAM, se estima que el costo de recolección del RSU es de aproximadamente PEN 265/t (\approx USD 75/t), lo cual permitiría que el PMV del SAF sea un 13% – 45% más alto que el del Jet-A1 en el Perú (8% – 29% más bajo que el precio internacional del SAF). Sin embargo, la tasa estimada de recolección puede variar según el municipio. Más estudios deben realizarse para estimar el costo de recolección del RSU en el Perú, el cual dependerá de la densidad de la materia prima, la distancia entre los centros de acopio y la hipotética ubicación de la instalación de SAF, la capacidad de carga de los vehículos y el salario de los recolectores.

Según datos del MINAM, la recolección de 1 kt de RSU genera en promedio 1.73 empleos directos. Con base en esta relación, se estima que el aprovechamiento del potencial máximo teórico de SAF en 2050 podría generar alrededor de 26 226 empleos directos. No obstante, considerando el potencial más probable, esta cifra se reduciría a 2 859 empleos directos. Por otro lado, la etapa de conversión de RSU a SAF demandaría aproximadamente 4 empleados en el escenario de potencial máximo teórico y 3 empleados en el escenario más probable. En consecuencia, la generación total de empleos directos alcanzaría 26 220 y 2 682 puestos para 2050, respectivamente. No se tiene noción de la generación de empleo indirecto involucrado en la transformación.

Evaluación general

La Tabla 7 resume los resultados en torno a la evaluación de la producción potencial de SAF a partir de RSU en el Perú. La tecnología es bien conocida y, aunque aún no se ha demostrado a gran escala industrial, podría estar disponible en el corto o medio plazo. Si esto ocurriera y todo el RSU fuese recolectado y empleado para la producción de SAF, sería posible reemplazar el consumo actual de Jet-A1 en un 87%. Sin embargo, un escenario más probable sería la producción de SAF a niveles que coincidan con los requerimientos de capacidad instalada para la transformación del RSU, cubriendo los requerimientos de Jet-A1 en un 12%. Para

lograrlo, habría que realizar esfuerzos para una recolección y gestión más eficiente de los RSU, puesto que, considerando los niveles de aprovechamiento actuales en el país, no habría disponible un volumen de residuo lo suficientemente grande para ser transformado en masa.

Se espera que el SAF a partir de RSU cumpla con todos los criterios de sostenibilidad definidos por la OACI, a excepción de la reducción mínima de GEI en base a ciclo de vida. De hecho, el alto contenido de plásticos en el RSU conlleva un factor de emisión un 27% más alto que el de la alternativa fósil. Si se pretende tomar en cuenta los RSU para la producción de SAF, se requeriría la separación de plásticos o al menos asegurarse de que estos contribuyan menos del 49% para cumplir con los requerimientos de mitigación de GEI, lo que puede encarecer el costo de recolección y tratamiento de la materia prima (y del SAF resultante).

En cuanto a su factibilidad, la viabilidad económica de la ruta estudiada depende del precio del residuo, es decir, de su recolección y tratamiento previo para su transformación, el cual, bajo los supuestos de este estudio, se estima que debe ser inferior a los PEN 133/t (\approx USD 38/t) para que el precio al público del SAF (sin incluir su distribución) sea equivalente al del Jet-A1 en aeropuertos y el sistema alcance una rentabilidad del 10% sobre la inversión al cabo de 20 años. Precios de recolección mayores conllevarían periodos de evaluación más extensos.

De acuerdo con los resultados en torno a la evaluación de disponibilidad de materias primas, la producción de SAF a partir de RSU requiere de:

- Realizar estudios de implementación empresarial y pruebas de campo para determinar los costos de producción a escala, así como los impactos de la producción.
- Vincular a los centros de acopio de los RSU con los corredores de materias primas para abastecer a las instalaciones que las aprovecharían para la producción de SAF.
- Redactar borradores de los documentos necesarios para obtener los permisos ambientales pertinentes.
- Evaluar otros riesgos implícitos del aprovechamiento de la materia prima y desarrollar un protocolo de contingencia.

2.3.2 Residuos agrícolas

Disponibilidad de la materia prima

La producción de SAF a partir de residuos agrícolas representa una alternativa prometedora para reducir las emisiones del sector aéreo. Este tipo de residuos, como paja de arroz, bagazo de caña, rastrojos de maíz y otros subproductos lignocelulósicos, están ampliamente disponibles en muchas regiones agrícolas y no compiten directamente con la producción de alimentos.

Mediante procesos termoquímicos o biotecnológicos, estos residuos pueden convertirse en biocombustibles avanzados con bajas emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con los combustibles fósiles. Además, su aprovechamiento contribuye a una gestión más sostenible de los residuos, genera oportunidades económicas en zonas rurales y puede integrarse en cadenas de valor existentes con el apoyo de políticas adecuadas.

No se encontraron estadísticas referentes a la generación de residuos agrícolas en el Perú. Sin embargo, es posible realizar una estimación basándose en la producción agrícola y usando factores de generación de residuos, tal como se realizó en el estudio (Reyes Chávez & Barrenechea Ramírez, 2022).

La producción de SAF a partir de residuos agrícolas puede realizarse mediante la ruta FT y se estima considerando el poder calorífico inferior del residuo, su contenido de humedad y eficiencia de transformación, tal como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Fórmulas aplicadas en este estudio (cálculo propio) para la estimación de la producción potencial de SAF a partir de residuos agrícolas.

Eq.	Fórmula	Abreviaciones
(8)	$Q_{SAF,RA} = \frac{E_{ff,RA} \times \sum [Q_{c,i} \times FR_i \times (1 - H_{r,i}) \times PCI_{RA,i}]}{PCI_{SAF}}$	<ul style="list-style-type: none"> • $Q_{SAF,RA}$, la cantidad estimada de SAF a partir de residuos agrícolas [kt]. • $E_{ff,RA}$, la eficiencia de transformación de residuo agrícola a SAF [MJ/MJ]. Se asume en 0.54 MJ/MJ. • $Q_{c,i}$, cantidad del i-ésimo recurso agrícola susceptible para la producción de SAF [kt]. • $H_{r,i}$, humedad del i-ésimo residuo agrícola susceptible para la producción de SAF [%] (ver anexo A5). • $PCI_{RA,i}$, poder calorífico inferior del i-ésimo residuo agrícola susceptible para la producción de SAF [MJ/kt] (ver anexo A5). • PCI_{SAF}, poder calorífico inferior del SAF [MJ/kg]. Se asume un valor de 42.8 MJ/kg (Boehm et al., 2022).

La Tabla 11 muestra la estimación de la producción de SAF en el Perú a partir de los residuos agrícolas de los principales cultivos, que alcanzaría un máximo teórico de 12 085 kt. Por sí solos, los residuos de la caña de azúcar comprenderían el 91% de este potencial. Sin embargo, esta situación puede cambiar en el caso de que el bagazo sea empleado para la cogeneración de calor y electricidad, situación que es esperable en el caso de la caña de azúcar empleada para la producción de etanol (y que, de hecho, está ocurriendo en algunas industrias de producción de este biocombustible). En general, el 12.60 % peso a peso de los residuos agrícolas puede ser transformado a SAF mediante la ruta FT.

Tabla 11. Estimación de la producción potencial de SAF en el Perú a partir de los residuos agrícolas de los principales cultivos.

Cultivo	Residuo	Generación de residuo en 2022 [t]	Potencial máximo teórico de SAF [kt]	Potencial máximo técnico de SAF [kt]
Arroz	Paja	8 081 681	170	113
Arroz	Cascarilla	687 803	14	10
Cacao	Cascarilla	154 852	2	1
Cacao	Mucílago	3 441	1	0
Café pergamino	Pulpa	157 598	26	17
Café pergamino	Cascarilla	75 217	2	1
Caña para alcohol	Hojas	2 101 402	136	90
Caña para alcohol	Bagazo	1 727 533	184	123
Caña para azúcar	Hojas	31 243 006	2 018	1 345
Caña para azúcar	Bagazo	25 684 434	2 743	1 829
Caña para etanol	Hojas	5 672 024	366	244

Cultivo	Residuo	Generación de residuo en 2022 [t]	Potencial máximo teórico de SAF [kt]	Potencial máximo técnico de SAF [kt]
Caña para etanol	Bagazo	4 662 891	498	332
Espárrago	Peladilla	184 851	4	3
Palma aceitera	Fibra	947 898	30	20
Plátano	Raquis	2 425 444	60	40
Plátano	Vástago	12 127 219	271	181
Total	—	95 937 295	6 526	4 351

Es recomendable dejar cierta cantidad de residuo agrícola en el campo para no interferir con los requerimientos nutrimentales del cultivo. Aunque no hay un consenso definido, algunos estudios indican que la fracción de residuo que se debe dejar en campo no debe ser inferior a 1/3. Considerando esta restricción, el potencial máximo técnico de SAF disminuiría a 4 351 kt (Tabla 11).

La Figura 22 muestra la proyección máxima teórica, técnica y más probable de SAF a partir de residuos agrícolas en el Perú. Se asume que la producción de SAF a partir de residuos agrícolas se pueda dar a partir del 2027 y, en el escenario más probable, se considera que únicamente se emplean los residuos de caña de azúcar para la producción de etanol. Para el 2030, se asume que se le añadirían los residuos del cultivo de caña de azúcar para otros fines. Para el 2035, se asume que se incluirían los residuos de la palma aceitera y, de allí en adelante, se asume que se añadirían los residuos de otros cultivos. De esta manera, para 2030, 2040 y 2050 se estima que la producción potencial más probable de SAF a partir de residuos orgánicos sea de 4 534 kt, 6 102 kt y 7 003 kt, respectivamente.

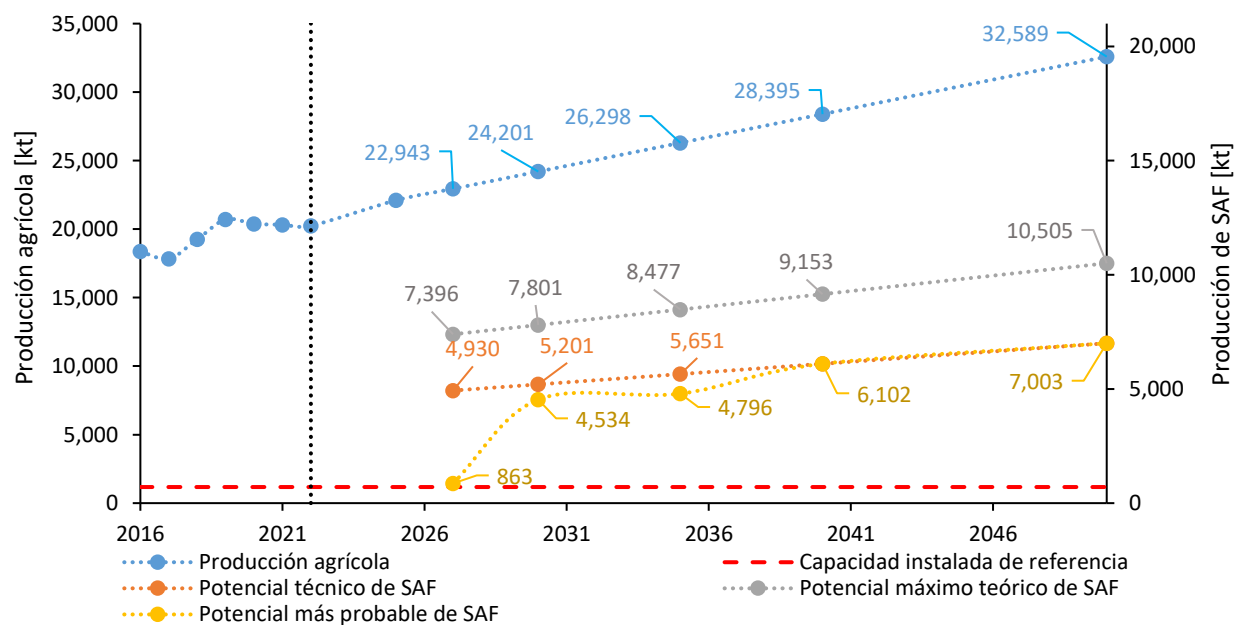


Figura 22. Proyección de la producción máxima teórica, técnica y más probable de SAF a partir de residuos agrícolas en el Perú.

Factores de sostenibilidad

Emisiones de GEI

Como ocurre con cualquier otro tipo de residuos, la metodología CORSIA de la OACI asume que no se generan emisiones durante la producción de materia prima, pero se incluirán las generadas durante la recolección, recuperación, extracción y procesamiento de estos residuos. Como se indicó en el caso de los RSU, tampoco se atribuyen emisiones por ILUC, asignándoseles, por tanto, un valor de cero en el cálculo de dicho valor.

Las emisiones de CO₂ de la producción de SAF a partir de los residuos agrícolas dependen, por tanto, en gran medida de su recolección y transporte, es decir, de la maquinaria usada en campo, los tipos de vehículos empleados y las distancias recorridas. De momento, las emisiones de GEI de la producción de SAF a partir de residuos agrícolas en el Perú se estima en 7.7 g CO_{2eq}/MJ, es decir, el equivalente al valor por defecto establecido por la OACI para residuos agrícolas, lo cual conlleva un potencial de mitigación del 91% respecto a la alternativa fósil.

Otros aspectos ambientales

No se espera que el aprovechamiento de los residuos agrícolas para la producción de SAF implique directamente incidencias en el uso o calidad del agua, el uso del suelo, la contaminación del aire o la biodiversidad.

Asimismo, aquellos emprendedores que quieran aprovechar los residuos agrícolas deben asegurarse de que las nuevas instalaciones no generen (o minimicen) residuos químicos peligrosos o impactos sísmicos o vibracionales.

Aspectos socioeconómicos

Aquellos emprendedores que quieran aprovechar los residuos agrícolas para la producción de SAF deben asegurarse de cumplir los requerimientos socioeconómicos establecidos por la OACI (ver Anexo A3). No se espera que esta ruta de conversión implique incidencias en derechos sobre tierras, uso de agua comunitario o la seguridad alimentaria. De hecho, la recolección y transformación de residuos agrícolas puede generar empleos.

Factores económicos

La Figura 23 muestra una estimación del PMV del SAF en función del precio del residuo agrícola, así como el precio máximo del residuo en función del periodo de evaluación después de haber construido la instalación (3 años). De acuerdo con el análisis, el precio de recolección del residuo debe ser menor a los PEN 294/t (≈USD 83/t) para que el PMV del SAF sea menor al precio del Jet-A1 en aeropuertos bajo un periodo de evaluación de 20 años y asumiendo una tasa de rentabilidad del 10% sobre la inversión. Si se desea obtener rendimientos económicos similares en un periodo de evaluación de 15 o 10 años, el precio de recolección del residuo debe descender a PEN 235/t (≈USD 66/t) y a PEN 107/t (≈USD 30/t), respectivamente. Periodos de evaluación más cortos a los 7 años implicarían un precio del SAF más alto que el del Jet-A1 en Lima, independientemente del precio de recolección del residuo.

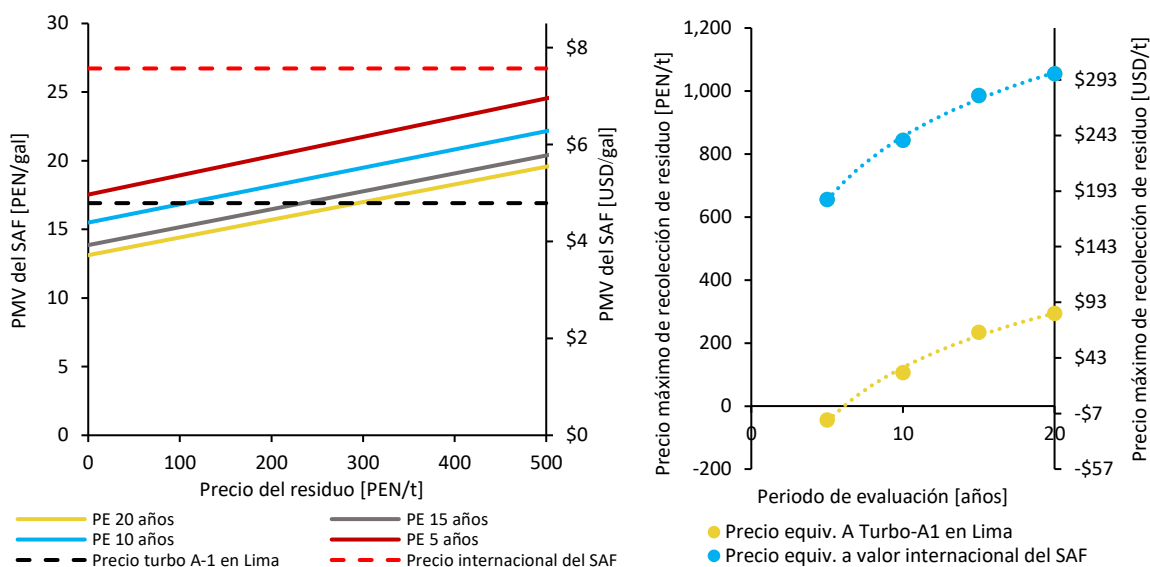


Figura 23. Estimación del PMV del SAF en función del precio del residuo agrícola (izquierda) y precio máximo de recolección del residuo para que el SAF alcance un PMV igual al del Jet-A1 en Lima (derecha). No se incluyen impuestos, otras tarifas o costos de distribución. PE, periodo de evaluación (excluyen los años de la construcción de la instalación). Los supuestos en torno a la evaluación se muestran en el Anexo A7.

Si se toma como valor de referencia el precio internacional del SAF, se tendría un mayor margen de los precios máximos del residuo, alcanzando los PEN 106/t (\approx USD 30/t), PEN 234/t (\approx USD 66/t) y los PEN 294/t (\approx USD 83/t) durante periodos de evaluación de 10, 15 y 20 años, respectivamente. Un periodo de evaluación inferior a los 6 años requeriría de un esquema en el que se puedan obtener ingresos de la recolección del residuo agrícola bajo una tarifa mayor a los PEN 44/t (\approx USD 13/t).

Más estudios deben realizarse para estimar el precio de los residuos agrícolas en el Perú para fines de valorización, el cual dependerá de la densidad de la materia prima, la distancia entre los centros de acopio y la hipotética ubicación de la instalación de SAF, la capacidad de carga de los vehículos y el salario de los recolectores. Se espera que el precio de recolección del residuo agrícola sea superior al de recolección de RSU.

No se encontraron estadísticas respecto a la generación de empleos para la recolección de residuos agrícolas. Sin embargo, asumiendo una tasa similar a la usada para la recolección de RSU (1.73 empleos directos por kt), se estima que el aprovechamiento del potencial máximo teórico de SAF en 2050 podría generar alrededor de 107 411 empleos directos para la recolección. No obstante, considerando el potencial más probable, esta cifra se reduciría a 71 607 empleos directos. Por otro lado, la etapa de conversión a SAF demandaría aproximadamente 10 empleados en el escenario de potencial máximo teórico y 9 empleados en el escenario más probable. En consecuencia, la generación total de empleos directos alcanzaría 107 421 y 71 616 puestos para 2050, respectivamente. No se tiene noción de la generación de empleo indirecto.

Evaluación general

La Tabla 7 resume los resultados en torno a la evaluación de la producción potencial de SAF a partir de residuos agrícolas en el Perú. La tecnología es bien conocida y, aunque aún no se ha demostrado a gran escala industrial, se espera que esté disponible en el corto o mediano plazo. Si todo el residuo agrícola fuese

recolectado y empleado para la producción de SAF, sería posible reemplazar todo el consumo actual de Jet-A1 e incluso generar un superávit del 551%. Sin embargo, un escenario más probable sería la producción de SAF aprovechando únicamente los residuos de la caña de azúcar empleada para la producción de etanol, cubriendo los requerimientos de Jet-A1 en un 58%.

Se espera que el SAF a partir de residuos agrícolas cumpla con todos los criterios de sostenibilidad definidos por la OACI.

En cuanto a la factibilidad, la viabilidad económica de la ruta estudiada depende del precio del residuo, es decir, de su recolección y tratamiento previo para su transformación, el cual, bajo los supuestos de este estudio, se estima que debe ser inferior a los PEN 294/t (\approx USD 83/t) para que el precio al público del SAF (sin incluir su distribución) sea equivalente al del Jet-A1 en aeropuertos y el sistema alcance una rentabilidad del 10% sobre la inversión al cabo de 20 años. Precios de recolección mayores conllevarían periodos de evaluación más extensos.

De acuerdo con los resultados en torno a la evaluación de disponibilidad de materias primas, la producción de SAF a partir de residuos agrícolas requiere de:

- Definir rangos de adaptación para la recolección de residuos agrícolas e identificar la incertidumbre en sus tasas de generación respecto a la producción agrícola (los resultados actuales se basan en datos de referencias científicas).
- Realizar una estimación más certera de los costos de recolección del residuo y su transformación a SAF.
- Redactar borradores de los documentos necesarios para obtener los permisos ambientales pertinentes.
- Evaluar los impactos de la extracción del residuo agrícola en torno a la producción agrícola y su desempeño económico y ambiental.

2.3.3 Sinergia con el etanol de caña de azúcar

Una transición de la actual capacidad de producción de etanol en el país hacia una capacidad de producción mixta de etanol y SAF (ATJ) con tecnologías más avanzadas podría suponer una sinergia para ambos mercados y hacia el impulso de los combustibles sostenibles en el Perú.

Disponibilidad de la materia prima

La Figura 24 muestra la disponibilidad de etanol en el Perú de 2012 a 2023, calculada como la suma de la producción local y las importaciones. La producción de etanol en el Perú se hace mediante la fermentación de caña de azúcar y, en 2023, alcanzó 149 kt. Por su parte, las importaciones han venido aumentando hasta alcanzar niveles similares a la producción actual para poder cumplir la demanda nacional. La Figura 24 también muestra la superficie cosechada de caña de azúcar para la producción de etanol y el rendimiento por unidad de área. La superficie se ha mantenido en alrededor de 13 000 ha con un rendimiento de alrededor de 10 t de etanol por ha.

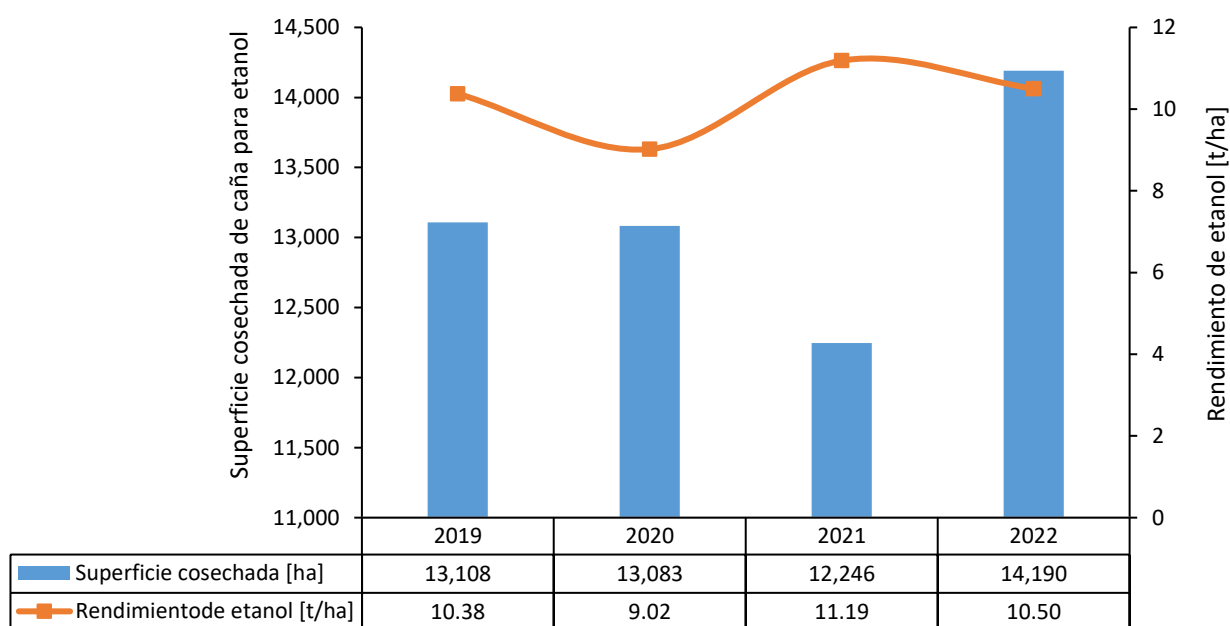
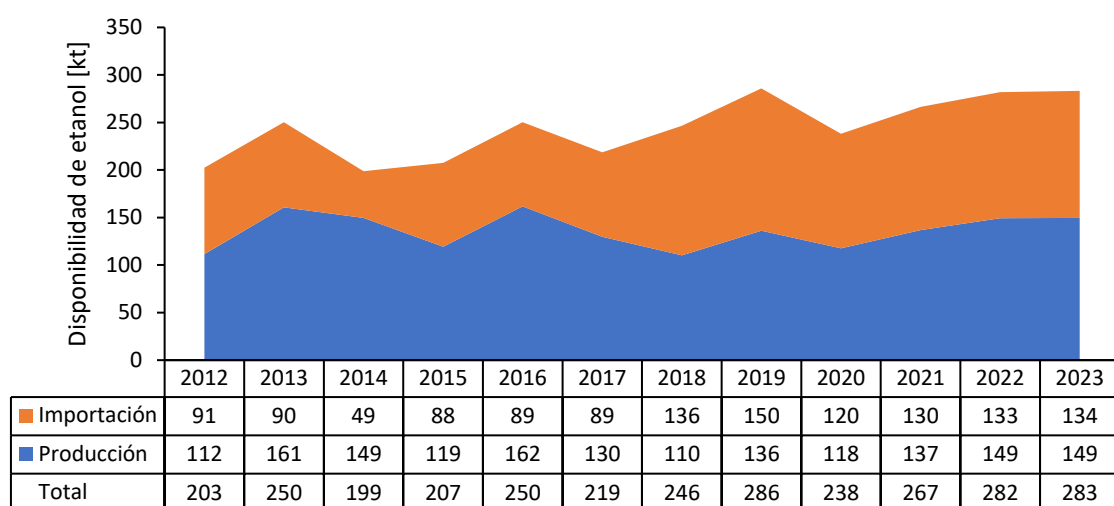


Figura 24. Producción e importación de etanol en el Perú (arriba) y superficie cosechada y rendimiento estimado de etanol de caña de azúcar en el Perú (MIDAGRI, 2024, 2025; Torroba & Chiara, 2024).

La actual producción de etanol es susceptible de presentar una transición a la producción de SAF mediante la ruta Alcohol-to-Jet (ATJ), alcanzando una producción potencial de SAF de 58 kt, la cual puede incrementar a 110 kt si se añadiese el etanol importado.

La Figura 25 muestra la proyección máxima teórica y más probable de SAF a partir de etanol en el Perú. Si se tuviese en cuenta todo el etanol disponible en el país, es decir, tanto el producido como el importado, la capacidad máxima de producción de etanol se estima en 128 kt, 154 kt y 181 kt para el 2030, 2040 y 2050, respectivamente. Sin embargo, asumiendo que solo el etanol producido localmente está disponible y que hay incentivos suficientes para que sea transformado en SAF en lugar de exportarse, se estima que la producción más probable de SAF sea de 55 kt, 57 kt y 58 kt para los años 2030, 2040 y 2050, respectivamente. Estas capacidades son ligeramente superiores a la capacidad instalada de referencia estimada para plantas de ATJ pioneras.

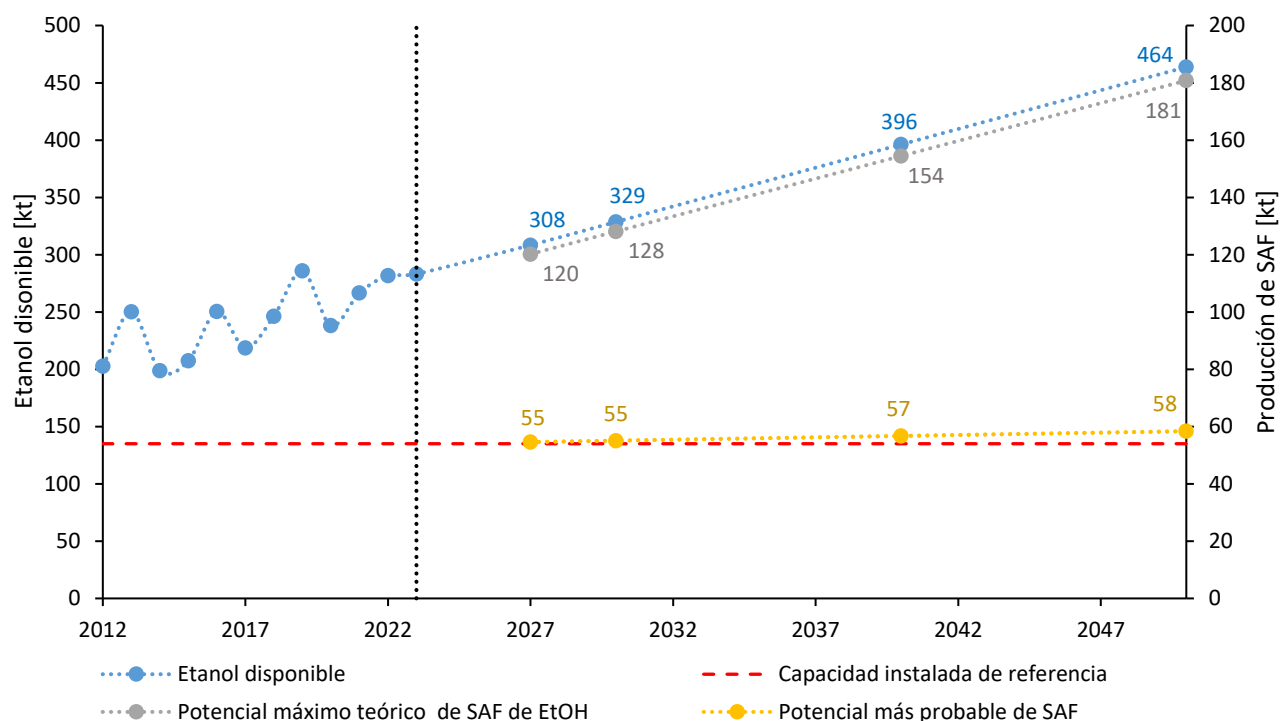


Figura 25. Proyección de la producción máxima teórica y más probable de SAF a partir de etanol en el Perú.

Factores de sostenibilidad

Emisiones de GEI

Dado que ya existen instalaciones de producción de etanol en el Perú, es más probable que una transición hacia la producción de SAF se dé en un contexto en el que el alcohol sea transformado en otra instalación (aunque compartan la misma ubicación); en otras palabras, que no se dé una integración energética entre los procesos de producción de etanol y de su transformación en SAF. Por tanto, el factor de emisión de GEI del SAF para este caso sería el establecido por defecto por CORSIA para el proceso ATJ a partir de caña de azúcar con instalaciones separadas, es decir, 41 gCO₂eq/MJ. No podrá en ningún caso a partir de biomasa obtenida de tierras convertidas después del 1 de enero de 2008 que fueran bosques primarios, humedales o turberas, o que contribuyan a la degradación de las reservas de carbono en bosques primarios, humedales o turberas, ya que todas estas tierras tienen altas reservas de carbono. De acuerdo con el criterio de sostenibilidad 2.2 establecido por CORSIA, si nuevas plantaciones de caña de azúcar para la producción de etanol ocupan suelos convertidos después de 2008, se tendrían que añadir las emisiones por concepto de cambio de uso de suelo. Cabe señalar que el criterio de sostenibilidad 2.1 establecido por CORSIA excluye la posibilidad de cultivar en suelos deforestados después de 2008 en cualquier situación. El valor por defecto establecido por CORSIA es de 11.9 g CO₂eq/MJ, lo que implicaría que el factor de emisión del SAF a partir de etanol de caña de azúcar siga teniendo el potencial de mitigación suficiente establecido por la OACI.

Otros aspectos ambientales

No se espera que la transición de etanol de caña de azúcar a SAF implique afectaciones en el uso del suelo, uso y calidad del agua y la biodiversidad, dado que, efectivamente, se emplearían las actuales cadenas de suministro. Sin embargo, esa situación puede cambiar en el caso de la adición de nuevos cultivos de caña de azúcar para etanol, especialmente si se realizan en zonas convertidas después de 2008 y aunque no sean

directamente responsables por ello. Por tanto, es necesario generar un sistema de trazabilidad en torno al uso de la tierra y el cambio de uso del suelo.

Aquellos emprendedores que quieran producir SAF a partir de etanol de caña de azúcar deben asegurarse de que las nuevas instalaciones no generen (o minimicen) residuos químicos peligrosos o impactos sísmicos o vibracionales.

Aspectos socioeconómicos

Aquellos emprendedores que quieran producir SAF a partir del etanol de caña de azúcar deben asegurarse de cumplir los requerimientos socioeconómicos establecidos por la OACI (ver Anexo A3). No se espera que esta ruta de conversión implique incidencias en derechos sobre tierras, uso de agua comunitario o la seguridad alimentaria si los cultivos se realizan en suelos marginales. De ser el caso, la implementación de nuevos cultivos puede generar empleos en el sector agrario.

Factores económicos

La Figura 26 muestra una estimación del PMV del SAF en función del precio del etanol de caña de azúcar, así como el precio máximo del etanol en función del periodo de evaluación después de haber construido la instalación (3 años). Los resultados indican que el precio del etanol debe ser menor a los PEN 2 120/t (\approx USD 601) para que el PMV del SAF sea menor al precio del Jet-A1 en aeropuertos bajo un periodo de evaluación de 20 años y asumiendo una tasa de rentabilidad del 10% sobre la inversión. Si se desea obtener rendimientos económicos similares en un periodo de evaluación de 15, 10 o 5 años, el precio del etanol debe descender a PEN 2 034/t (\approx USD 576), PEN 1 889/t (\approx USD 535) y a PEN 1 645/t (\approx USD 466), respectivamente. El precio promedio del etanol para exportación es de unos PEN 2 315/t (\approx USD 656) (Agrodataperu, 2025a), lo que implica que una transición del biocombustible conllevaría un SAF con un precio más alto ($>11\%$) que el del Jet-A1.

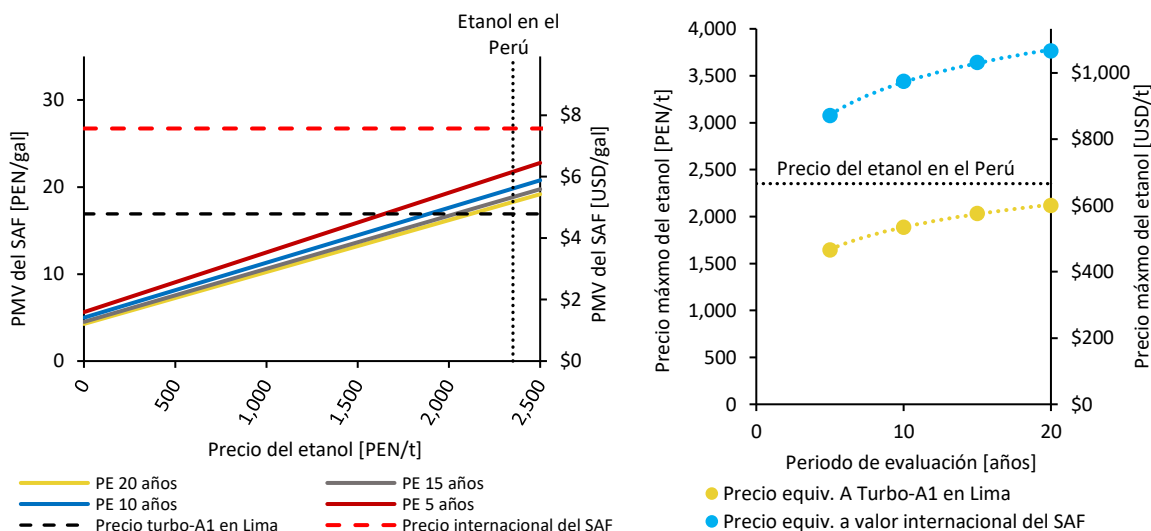


Figura 26. Estimación del PMV del SAF en función del precio del etanol de caña de azúcar (izquierda) y precio máximo del etanol para que el SAF alcance un PMV igual al del Jet-A1 en Lima (derecha). No se incluyen

impuestos, otras tarifas o costos de distribución. PE, periodo de evaluación (excluyen los años de la construcción de la instalación). Los supuestos en torno a la evaluación se muestran en el Anexo A7.

Si se toma como valor de referencia el precio internacional del SAF, se tendría un mayor margen de los precios máximos del etanol, alcanzando los PEN 1 645/t (\approx USD 466/t), PEN 1 889/t (\approx USD 535/t), PEN 2 034/t (\approx USD 576/t) y los PEN 2 120/t (\approx USD 601/t) durante periodos de evaluación de 5, 10, 15 y 20 años, respectivamente.

De acuerdo con datos proporcionados por miembros de Perucaña, la industria de caña de azúcar emplea alrededor de 100 000 empleados directos e indirectos, lo que conlleva una tasa de generación de empleos de 1.11 empleos por hectárea. Asumiendo que un tercio de dichos empleos son directos, se estima que la sinergia de etanol de caña de azúcar mantendría 42 314 y 64 111 empleos directos e indirectos bajo el potencial máximo teórico de SAF a 2050, respectivamente. Considerando el potencial más probable, estas cifras se reducirían a 13 662 y a 20 699, respectivamente. Por otro lado, la conversión de caña de azúcar demandaría cerca de 4 empleados directos en el escenario de potencial máximo teórico y 3 empleados directos en el escenario más probable. No se tiene noción de la generación de empleo indirecto involucrado en la transformación.

Evaluación general

La Tabla 7 resume los resultados en torno a la evaluación de la producción potencial de SAF a partir de la transición del etanol de caña de azúcar a SAF. Aunque la tecnología está avanzada, aún se encuentra en etapas de demostración de prototipos. Si todo el etanol disponible (tanto el producido como el importado) fuese empleado para la producción de SAF, el máximo potencial teórico sería suficiente para reemplazar el consumo actual de Jet-A1 en un 12%. Sin embargo, un escenario más probable contempla solo la transición de la producción local, alcanzando un potencial de SAF más probable que sea suficiente para suplir el 5.5% del consumo de Jet-A1.

Se espera que el SAF a partir de la caña de azúcar cumpla con todos los criterios de sostenibilidad definidos por la OACI, a menos que los cultivos se den en suelos convertidos después del 2008, en cuyo caso, se debe realizar una estimación de las emisiones por concepto de cambio de uso del suelo y asignar el valor correspondiente.

En cuanto a la factibilidad, la viabilidad económica depende del precio del etanol, que, a su vez, depende de factores como el rendimiento en campo. Bajo los supuestos de este estudio, el precio del etanol debe ser menor a los 2 120/t (\approx USD 601) para que el PMV del SAF sea menor al precio del Jet-A1 en aeropuertos bajo un periodo de evaluación de 20 años y asumiendo una tasa de rentabilidad del 10% sobre la inversión. Esto implica que una transición del etanol de caña de azúcar conlleve un SAF más caro ($>14\%$) que el Jet-A1 en Lima, puesto que el etanol para exportación tiene un precio promedio de 2 315/t (\approx USD 656).

De acuerdo con los resultados en torno a la evaluación de disponibilidad de materias primas, la producción de SAF a partir de la transición de etanol de caña de azúcar requiere de:

- Establecer planes de investigación y desarrollo para mejorar la cadena de suministro de etanol.
- Mantener el cumplimiento del marco regulatorio actual en torno a la producción de etanol y adaptarse a un nuevo marco, su transformación potencial a SAF.
- Llevar a cabo estudios para una estimación más certera de las emisiones de GEI del SAF de etanol de caña en base a su ciclo de vida.

2.3.4 Transición de biodiésel de aceites vegetales a SAF

Una transición de la actual capacidad de producción de biodiésel en el país hacia una capacidad de producción mixta de biodiésel y SAF con tecnologías más avanzadas podría suponer una sinergia para ambos mercados y hacia el impulso de los combustibles sostenibles en el Perú.

Disponibilidad de materia prima

El Perú es un exportador neto de aceite de palma, uno de sus cultivos más importantes. Sin embargo, el país también importa otros tipos de aceites, como de oliva o de girasol. De 2016 a 2022, las importaciones de aceites vegetales hacia el Perú se han mantenido entre 412 y 647 kt. Considerando lo anterior, así como la utilización de aceites de palma para el 2022 (Figura 27) y las exportaciones, el aceite vegetal disponible en el país es estimado en 548 kt. Asimismo, basándose en la producción de biodiésel para ese año, su consumo aparente sería de alrededor de 364 kt. Esta estimación es bastante cercana a la presentada en otro estudio (GlobalData, 2023). El balance de aceites también indica que el biodiésel en el país es producido a partir de una mezcla de aceites, lo cual coincide con información obtenida en discusiones con agentes nacionales.

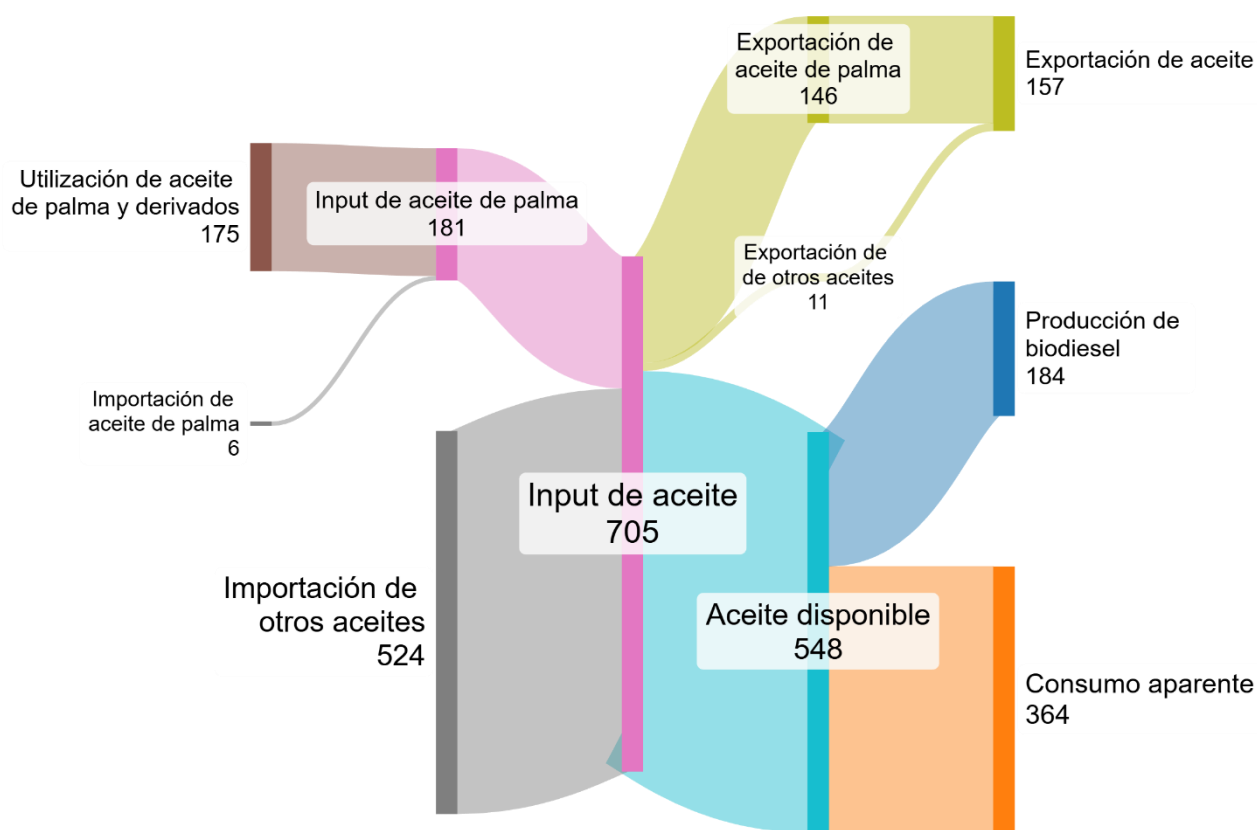


Figura 27. Estimación balance comercial de aceites vegetales en el Perú en el 2022. Datos en kt estimados a partir de MIDAGRI (2025). Dado que no se encontraron estadísticas unificadas locales en torno a la producción de aceite de palma, se usó la utilización del mismo para la estimación del input de aceite.

La Figura 28 muestra la disponibilidad de biodiésel en el Perú de 2012 a 2023, calculada como la suma de la producción local y las importaciones. El sector del biodiésel en Perú no ha alcanzado los niveles de producción previstos en los mandatos de mezcla debido a la insuficiente disponibilidad de materia prima nacional, por lo que se requiere de importaciones para suplir la demanda (Binda García et al., 2012). Sin embargo, su producción interna ha aumentado significativamente (510%) de 2017 a 2023.

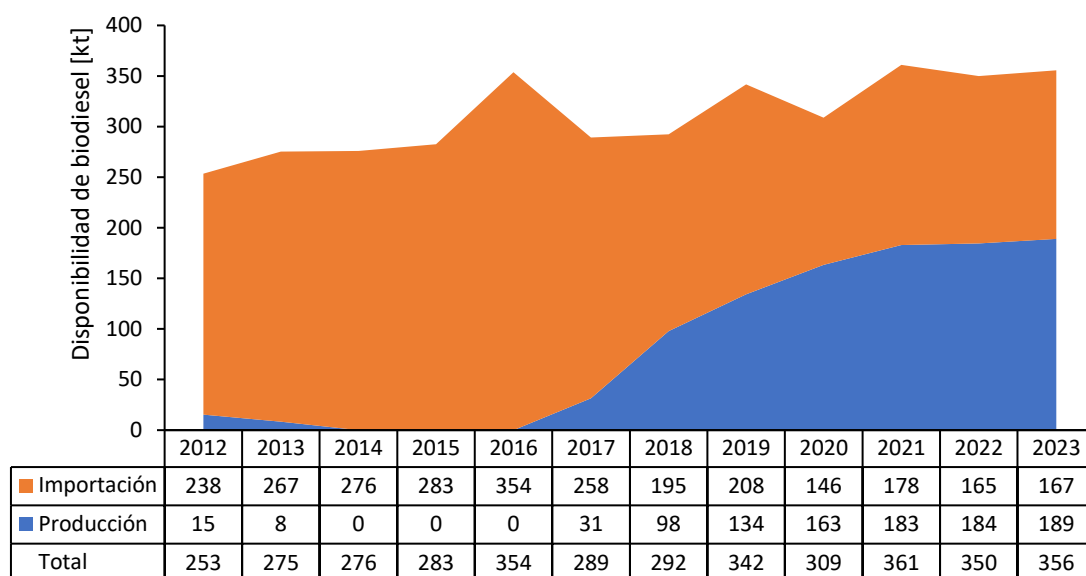


Figura 28. Disponibilidad de biodiésel en el Perú. Datos de Toborra & Chiara (2024).

La producción de SAF a partir de aceites vegetales podría darse mediante una transición de la industria de producción de biodiésel a SAF mediante el proceso HEFA o coprocesado. En otras, palabras, el aceite vegetal empleado para la producción de biodiésel (estimado en 189 kt en 2023) podría ser empleado para la producción de 149 kt o 75.6 kt de SAF mediante la ruta HEFA o coprocesado, respectivamente.

La Figura 29 muestra la proyección de la producción máxima teórica, y más probable de SAF a partir de la transición del biodiésel de aceites vegetales. Considerando que no hay factores políticos o económicos que afecten significativamente su tendencia de crecimiento, se estima que el potencial máximo teórico de SAF alcanzaría los 275 kt, 442 kt y 609 kt para el 2030, 2040 y 2050, respectivamente, considerando el proceso HEFA. En caso de darse una transición, esta se daría más probablemente mediante la ruta del coprocesado, lo que implicaría una producción de SAF estimada en 140 kt, 224 kt y 309 kt para el 2030, 2040 y 2050, respectivamente.

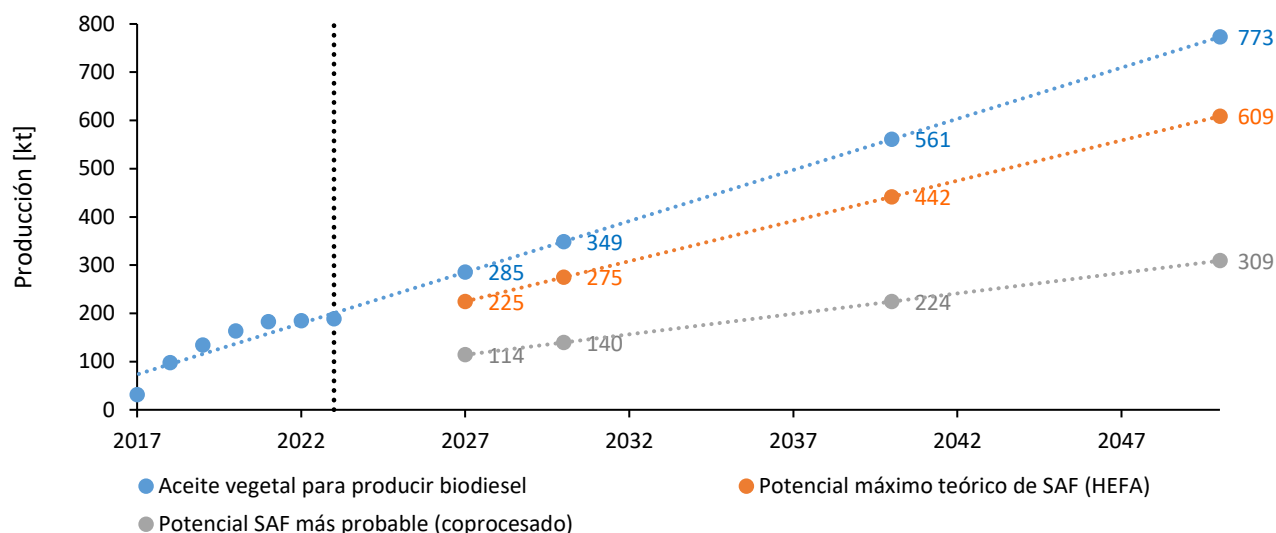


Figura 29. Proyección de la producción máxima teórica, y más probable de SAF a partir de la transición del biodiésel de aceites vegetales.

Factores de sostenibilidad

Emisiones de GEI

Las emisiones de CO₂ de la producción de SAF de aceites vegetales dependen en gran medida de la mezcla de aceites empleados para su transformación. Dado que no hay información específica de la composición de aceites para la producción de biodiésel en el Perú, se toma el valor por defecto para la conversión de aceite de canola mediante el proceso HEFA de 47.4 gCO₂eq/MJ (el más alto para esta ruta de conversión), lo que conlleva un potencial de mitigación del 47% respecto al Jet-A1.

Si los aceites vegetales fuesen transformados a SAF mediante coprocesado (escenario más probable), el factor de emisión de GEI sería de 40.7 gCO₂eq/MJ, correspondiente al uso de aceite de soja (tomando como referencia el valor más desfavorable dada la falta de información sobre la composición real), alcanzando un potencial de mitigación del 54%. Dicho potencial podría ser bastante mayor con el empleo de otros tipos de aceites, por ejemplo, residuales como el aceite de cocina usado.

Otros aspectos ambientales

No se espera que la transición de biodiésel de aceites vegetales a SAF implique afectaciones en el uso del suelo, uso y calidad del agua y la biodiversidad, dado que, efectivamente, se emplearían las actuales cadenas de suministro de aceite. Aquellos emprendedores que quieran producir SAF a partir de etanol de caña de azúcar deben asegurarse de que las nuevas instalaciones no generen (o minimicen) residuos químicos peligrosos o impactos sísmicos o vibracionales.

Aspectos socioeconómicos

Aquellos emprendedores que quieran producir SAF a partir de la transición de biodiésel de aceites vegetales deben asegurarse de cumplir los requerimientos socioeconómicos establecidos por la OACI (ver Anexo A3). No se espera que esta ruta de conversión implique incidencias en derechos sobre tierras, uso de agua comunitario o la seguridad alimentaria, pero, procediendo gran parte de los aceites vegetales de cultivos, se deberá verificar en cada caso.

Factores económicos

La Figura 30 muestra una estimación del PMV del SAF producido mediante el proceso HEFA en función del precio del aceite vegetal usado, así como el precio máximo del aceite vegetal usado en función del periodo de evaluación después de haber construido la instalación (3 años). Los resultados indican que el precio del aceite debe ser menor a los PEN 3 488/t (\approx USD 988/t) para que el PMV del SAF sea menor al precio del Jet-A1 en aeropuertos bajo un periodo de evaluación de 20 años y asumiendo una tasa de rentabilidad del 10% sobre la inversión. Si se desea obtener rendimientos económicos similares en un periodo de evaluación de 15, 10 o 5 años, el precio del aceite vegetal usado debe descender a PEN 3 403/t (\approx USD 9 644/t), PEN 3 250/t (\approx USD 921/t) y a PEN 2 978/t (\approx USD 843/t), respectivamente. El precio del aceite de soya en bruto importado es de unos PEN 4 000/t (\approx USD 1 133/t) (Agrodataperu, 2025b), lo que conllevaría un SAF con un precio un 15% mayor al del Jet-A1.

Si se toma como valor de referencia el precio internacional del SAF, se tendría un mayor margen de los precios máximos del aceite, alcanzando los PEN 5 282/t (\approx USD 1 496/t), PEN 5 675/t (\approx USD 1 608/t), PEN 5 878/t (\approx USD 1 665/t) y los PEN 5 994/t (\approx USD 1 698/t) durante periodos de evaluación de 5, 10, 15 y 20 años, respectivamente.

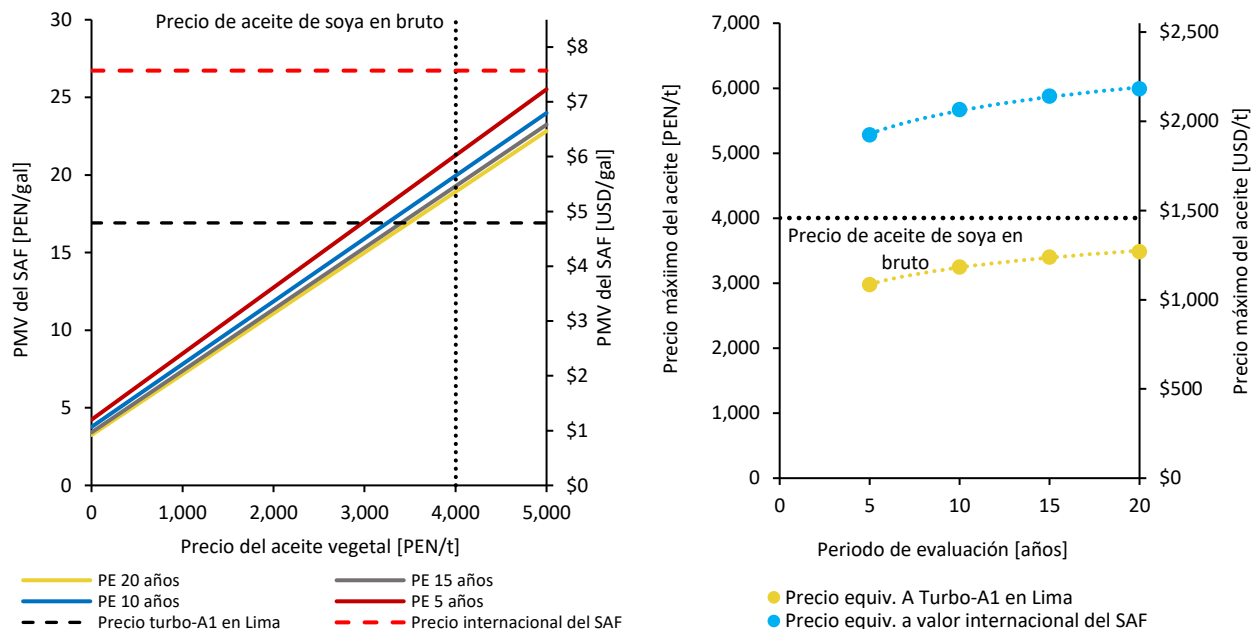


Figura 30. Estimación del PMV del SAF mediante el proceso HEFA en función del precio del aceite vegetal (izquierda) y precio máximo del aceite para que el SAF alcance un PMV igual al del Jet-A1 en Lima (derecha). No se incluyen impuestos, otras tarifas o costos de distribución. PE, periodo de evaluación (excluyen los años de la construcción de la instalación). Los supuestos en torno a la evaluación se muestran en el Anexo A7.

El análisis económico del SAF a partir de la ruta de coprocesado de lípidos, depende del precio del aceite vegetal, su transporte hacia la refinería y los costos de refinado en sí mismos, que son aspectos muy específicos dependiendo de las condiciones de operación. Sin embargo, un estudio muestra que la contribución del aceite de palma (usado como materia prima) contribuye en un 63% a los costos de su transformación y que el costo de operación asignable al SAF sería de aproximadamente \approx USD 552.4/t (PEN 1 950/t) (Pipitone et al., 2023). Teniendo en cuenta estos datos, se realizó una estimación preliminar del costo de producción del SAF en función del precio del aceite (Figura 31). Los resultados indican que el precio

del aceite (sin incluir tarifas de recolección o transporte) debe ser menor a los PEN 4 249/t (\approx USD 1 204/t) para que el costo de producción del SAF sea menor al precio del Jet-A1 en aeropuertos bajo un periodo de evaluación de 20 años y asumiendo una tasa de rentabilidad del 10% sobre la inversión. Este análisis debe realizarse considerando las condiciones locales. Si se toma como valor de referencia el precio internacional del SAF, se tendría un mayor margen de los precios máximos del aceite, alcanzando los PEN 7 130/t (\approx USD 2 020/t).

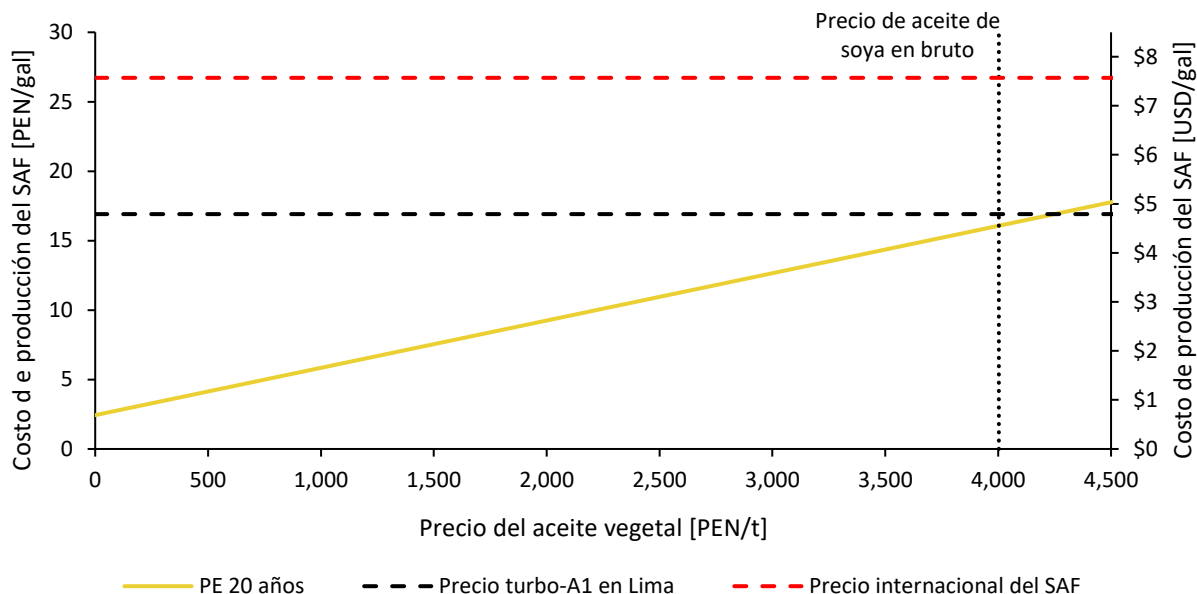


Figura 31. Estimación del costo de producción del SAF mediante coprocesado en función del precio del aceite vegetal. No se incluyen impuestos, otras tarifas o costos de distribución. PE, periodo de evaluación (excluyen los años de la construcción de la instalación).

No se tiene conocimiento respecto a la generación de empleo en la industria de conversión de aceites a biocombustibles. Sin embargo, un estudio señala que la recolección de 1 kt de aceites vegetales residuales genera aproximadamente 0.783 empleos directos (Klenert et al., 2025). Considerando esta tasa y las ecuaciones de la Tabla 6, se estima que la transición del biodiésel de aceites vegetales a SAF permitiría el mantenimiento de unos 611 y 312 empleos directos bajo el potencial máximo teórico y más probable, respectivamente. No se tiene noción de la generación de empleos indirectos en esta ruta de producción de SAF.

Evaluación general

La Tabla 7 resume los resultados en torno a la evaluación de la producción potencial de SAF a partir de la transición de la actual producción de biodiésel a partir de aceites vegetales hacia una capacidad de producción multi-producto biodiésel y SAF. La tecnología para la conversión (HEFA o coprocesado) está disponible a nivel comercial.

Si todo el aceite vegetal empleado para la producción de biodiésel fuese empleado para la producción de SAF, el máximo potencial teórico sería suficiente para reemplazar el consumo actual de Jet-A1 en un 15%, teniendo en cuenta la conversión vía HEFA. Sin embargo, un escenario más probable contempla la conversión vía coprocesado, lo que conllevaría un potencial que cubre el consumo actual de Jet-A1 en un 7.6%.

Se espera que el SAF a partir de la transición de biodiésel de aceites vegetales, cumpla con todos los criterios de sostenibilidad definidos por la OACI, ya que se aprovecharían las cadenas de suministro existentes. En cuanto a la factibilidad, la viabilidad económica depende del precio del aceite vegetal. Bajo los supuestos de este estudio, el precio del aceite debe ser menor a los PEN 3 488/t (\approx USD 988/t) para que el PMV del SAF sea menor al precio del Jet-A1 en aeropuertos bajo un periodo de evaluación de 20 años y asumiendo una tasa de rentabilidad del 10% sobre la inversión. Considerando el precio del aceite de soya en bruto [PEN 4 000/t (USD 1 133/t)], el PMV del SAF sería un 15% mayor al del Jet-A1 en Lima bajo el proceso HEFA.

De acuerdo con los resultados en torno a la evaluación de disponibilidad de materias primas, la producción de SAF a partir de la transición de etanol de caña de azúcar requiere de:

- Establecer planes de investigación y desarrollo para mejorar la cadena de suministro de los aceites vegetales.
- Vincular a los centros de acopio de las plantas de biodiésel con los corredores de materias primas para abastecer a las instalaciones que las aprovecharían para la producción de SAF.
- Mantener el cumplimiento del marco regulatorio actual en torno a la producción de biodiésel de aceites vegetales y adaptarse a un nuevo marco para su transición potencial a SAF.
- Llevar a cabo estudios para una estimación más certera de las emisiones de GEI del SAF a partir de aceites vegetales en base a su ciclo de vida.

2.3.5 Aceite de palma

Disponibilidad de materia prima

El aceite de palma es uno de los principales aceites vegetales producidos en el Perú, con una creciente relevancia económica en regiones como Ucayali y San Martín. Su cultivo no solo contribuye al desarrollo rural y la generación de empleo, sino que también representa una materia prima potencial para la producción de biocombustibles avanzados como el SAF.

La Figura 32 muestra la superficie cosechada de palma aceitera, así como el balance comercial de aceite de palma en el Perú considerando cifras oficiales sobre la fracción utilizada en el país. Las tendencias muestran que, tanto la producción como la exportación de aceite de palma, se han incrementado en el periodo de 2016 a 2022 en un 56% y 238%, respectivamente. Las importaciones de aceite de palma se han mantenido constantes entre los 6 y 8 kt/año, habiendo un repunte en el 2020 de 17 kt, probablemente debido a los efectos de la pandemia. En general, el consumo aparente de aceite de palma en el país ha disminuido en un 52% de 2016 a 2022.

La Figura 8 muestra la distribución geoespacial de los cultivos de palma aceitera en el Perú. En el 2016, el departamento de San Martín ocupaba la mayor extensión con 24 023 ha, seguido por el departamento de Ucayali (15 738 ha), Loreto (8 898 ha) y Huánuco (2 398 ha). Sin embargo, en 2022, el departamento de Ucayali reemplazó al departamento de San Martín, ocupando una superficie de cultivo de 42 913 ha.

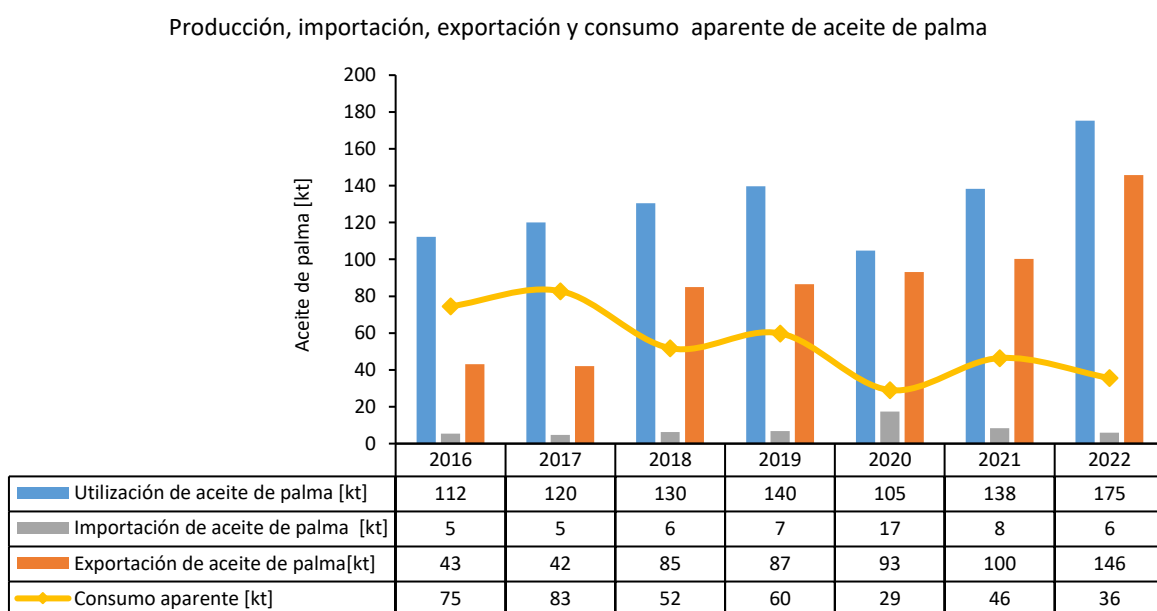
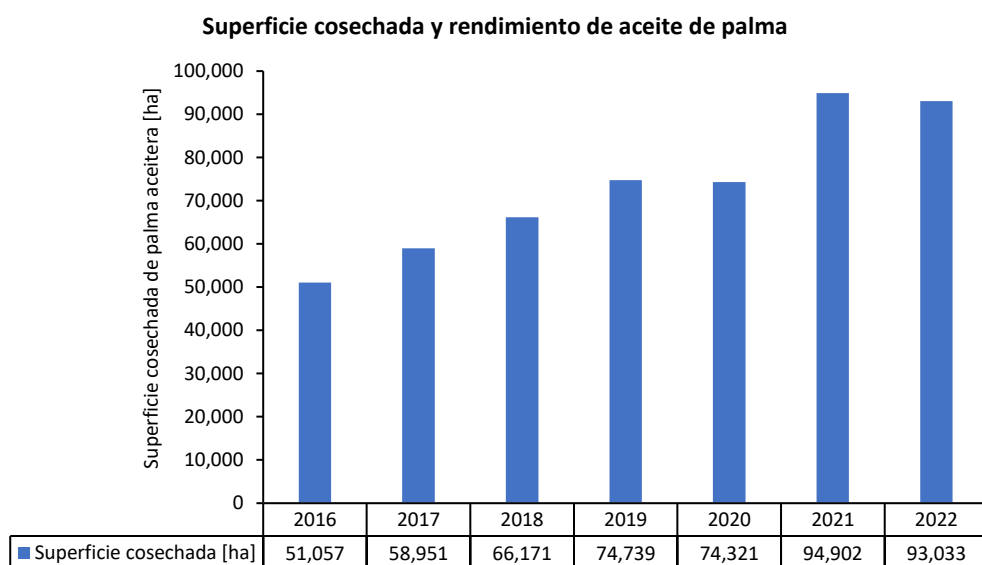


Figura 32. Superficie cosechada de palma aceitera, utilización, exportación y consumo aparente de aceite de palma en el Perú. Estimaciones a partir de MIDAGRI (2025).

Una parte significativa del aceite de palma en el Perú es exportada y una fracción de ello podría ser empleada para la producción de SAF asumiendo que las necesidades internas de consumo alimentario están cubiertas. Así, la máxima disponibilidad de aceite de palma para la producción de SAF se estimaría en 146 kt, lo que sería suficiente para producir 115 kt de SAF.

La Figura 33 muestra la proyección de la producción máxima teórica, y más probable de SAF a partir de aceite de palma. Considerando que no hay factores políticos o económicos que afecten significativamente su tendencia de crecimiento, se estima que el potencial máximo teórico de SAF alcanzaría los 201 kt, 322 kt y 444 kt para los años 2030, 2040 y 2050 respectivamente, considerando el proceso HEFA. Es más probable que el aprovechamiento se diese mediante la ruta del coprocesado, lo que implicaría una producción de SAF estimada en 102 kt, 164 kt y 226 kt para el 2030, 2040 y 2050, respectivamente.

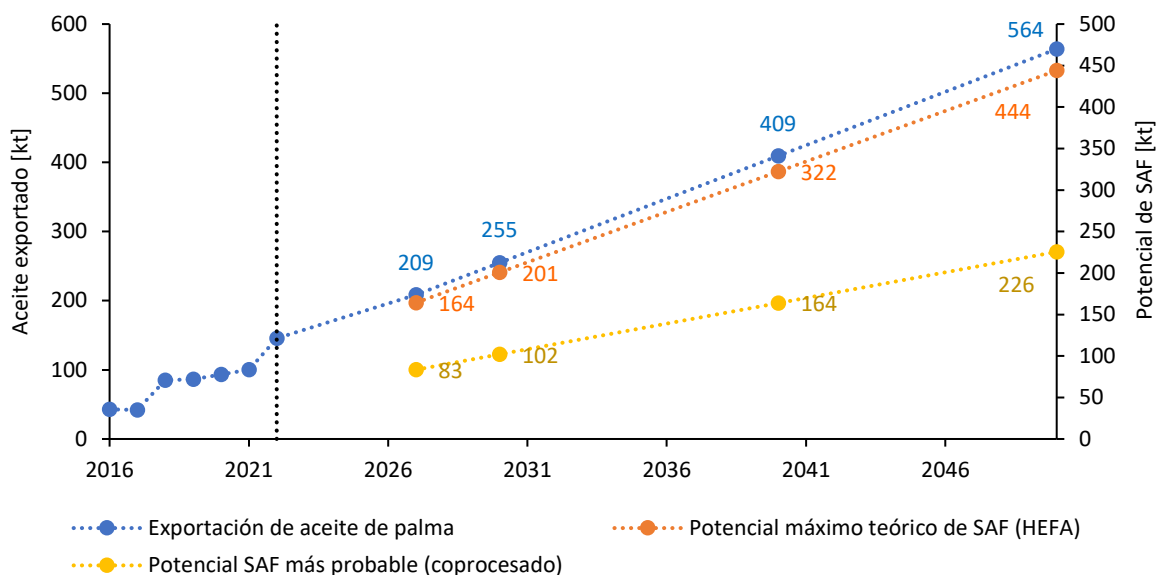


Figura 33. Proyección de la producción máxima teórica, y más probable de SAF a partir de aceite de palma.

Factores de sostenibilidad

Emisiones de GEI

Las emisiones de CO₂ de la producción de SAF de aceite de palma dependen considerablemente de las condiciones de cultivo y rendimiento. El valor por defecto establecido por CORSIA para esta ruta vía HEFA es de 37.4 gCO₂eq/MJ, en el caso de que el biogás generado de los efluentes residuales sea capturado y tratado mediante digestión anaeróbica. En caso contrario, las emisiones de GEI ascienden a 60 gCO₂eq/MJ, lo que en la práctica no lo hace apto para su certificación como SAF bajo CORSIA. A estos valores hay que sumarle el valor por defecto del ILUC, que es de 3.1 gCO₂eq/MJ. Por tanto, el SAF producido por HEFA a partir de aceite de palma con captura y digestión anaeróbica de efluentes es de $37.4 + 36.6 = 74$ gCO₂eq/MJ. Si el hidrógeno utilizado en la producción de SAF está producido a partir de carbón, se debe añadir a esos valores + 5.7 gCO₂eq/MJ (ICAO, 2021). No hay un dato establecido por defecto para el coprocesado de aceite de palma, pero los resultados de un estudio lo estiman en 25.7 g CO₂eq/MJ (Pipitone et al., 2023).

Es importante realizar una trazabilidad del uso del suelo para el cultivo, ya que, en el caso de ocupar suelos convertidos después del 2008, se deben estimar las emisiones por concepto de cambio directo de uso de suelo (que pueden ser más grandes que el valor ILUC anteriormente citado). Los valores relativamente altos de emisiones de GEI en el ciclo de vida del aceite de palma hacen que sea una materia prima con poco potencial. Pueden, sin embargo, mejorarse esos valores, si se aplican prácticas agrarias compatibles con la certificación bajo el esquema CORSIA “Low ILUC” o de bajos efectos inducidos en el cambio de uso del suelo, como pueden ser cantidades producidas por incrementos de productividad sin expansión de tierras, o el uso de determinados terrenos agrícolas abandonados o marginales. Por otra parte, el Destilado de Ácidos Grasos de Palma (PFAD) se considera un co-producto y no se le asigna un valor de ILUC, por lo que tiene un valor bajo de análisis de ciclo de vida (20.7 gCO₂eq/MJ). Si el hidrógeno usado para la producción de SAF procede de carbón, este valor se debe corregir añadiendo + 6.7 gCO₂e/MJ. Finalmente, el Efluente de Molino de Aceite de Palma [Palm Oil Mill Effluent (POME)] está incluido en la lista positiva de identificación de materiales considerados residuos bajo CORSIA y, por tanto, no tiene que aplicársele el valor ILUC. Sin embargo, aún no existe un valor por defecto del mismo.

Otros aspectos ambientales

La producción de SAF a partir de aceite de palma puede implicar afectaciones en el uso del suelo, uso y calidad del agua y la biodiversidad, muy especialmente si se emplean zonas deforestadas (sean o no directamente responsables por ello). Por tanto, es necesario generar un sistema de trazabilidad en torno al uso de la tierra y el cambio de uso del suelo.

Aquellos emprendedores que quieran producir SAF a partir de aceite de palma deben asegurarse de que las nuevas instalaciones no generen (o minimicen) residuos químicos peligrosos o impactos sísmicos o vibracionales.

Aspectos socioeconómicos

Aquellos emprendedores que quieran producir SAF a partir de aceite de palma deben asegurarse de cumplir los requerimientos socioeconómicos establecidos por la OACI (ver Anexo A3). No se espera que esta ruta de conversión implique incidencias en derechos sobre tierras, uso de agua comunitario o la seguridad alimentaria, siempre y cuando se emplee el aceite destinado a exportación.

Factores económicos

Las tendencias en torno al PMV del SAF producido mediante el proceso HEFA o coprocesado son iguales a las mostradas en la Figura 30 y la Figura 31 para aceites vegetales, respectivamente. Se espera que el aceite crudo de palma sea más costoso que el de soya, lo que comprometería más la viabilidad económica de esta ruta.

De acuerdo a miembros de la Federación Nacional de Palmicultores del Perú, el cultivo de palma genera 0.2 y 0.3 empleos directos e indirectos por hectárea, respectivamente. En base a estos factores, se estima que el aprovechamiento del potencial máximo teórico de SAF en 2050 podría generar alrededor de 59 989 y 89 983 empleos directos e indirectos, respectivamente. Por otro lado, la etapa de conversión de aceite de palma a SAF demandaría aproximadamente 4 empleados. En consecuencia, la generación total de empleos alcanzaría 149 976 para 2050.

Evaluación general

La Tabla 7 resume los resultados en torno a la evaluación de la producción potencial de SAF a partir de aceite de palma. La tecnología para la conversión (HEFA o coprocesado) está disponible a nivel comercial. Si solo el aceite exportado fuese usado para la producción de SAF, el máximo potencial teórico sería suficiente para reemplazar el consumo actual de Jet-A1 en un 11%, teniendo en cuenta la conversión vía HEFA. Sin embargo, un escenario más probable contempla la conversión vía coprocesado, por su menor necesidad de inversión y uso de refinerías existentes, lo que conllevaría un potencial que cubre el consumo actual de Jet-A1 en un 6%.

La capacidad de la producción de SAF a partir de aceite de palma para cumplir con los criterios de sostenibilidad de la OACI depende considerablemente de sus prácticas de producción y del uso primario del suelo en donde se realicen los cultivos. Por tanto, es necesario llevar a cabo un plan de trazabilidad para ello. La viabilidad económica de la producción de SAF a partir de aceite de palma, así como su evaluación de disponibilidad de materias primas, es la misma que la expuesta para el caso de usar otros aceites vegetales (ver sección 2.3.4).

2.3.6 Aceites residuales

Disponibilidad de materia prima

Si todo el aceite vegetal consumido en el Perú (Figura 27) fuese efectivamente recolectado al final de su vida útil y asumiendo un rendimiento del 40% (Pipitone et al., 2023), se podrían generar alrededor de 213 kt de SAF a través de la ruta del coprocesado en refinerías de petróleo, lo que supondría en torno al 21% del consumo actual de Jet-A1. Sin embargo, no todo el aceite residual es recolectado. De acuerdo con datos proporcionados por el MINAM, aproximadamente 228 t de aceites residuales y 125 t de grasas y aceite de pollo fueron recolectados durante el 2023 (Figura 34), lo que representa alrededor del 0.06% del consumo aparente de aceites vegetales en el país.

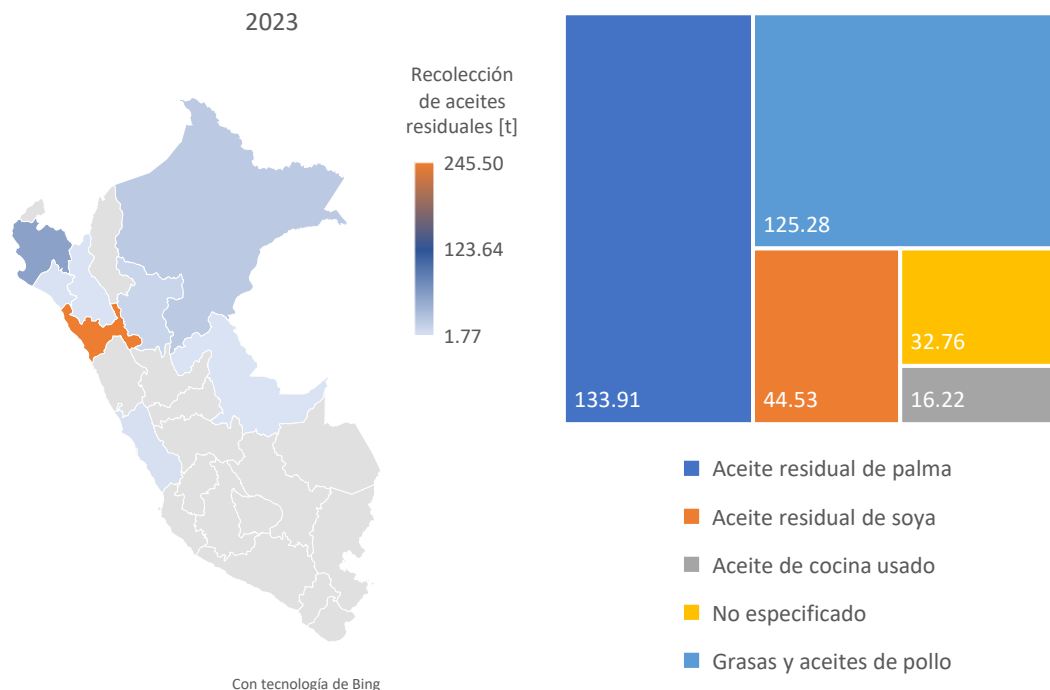


Figura 34. Distribución de la recolección de aceites residuales y su composición en 2023. Datos en toneladas proporcionados por el MINAM.

El departamento de La Libertad es el que presentó los mayores niveles de recolección de aceites residuales de palma y soya, seguido por el departamento de Piura. Por otro lado, el departamento de San Martín es aquel que presentó la mayor recolección de aceite de cocina usado. Asumiendo que la cantidad efectiva recolectada de aceites vegetales y grasas es transformada a SAF, su potencial alcanzaría aproximadamente 0.10 kt.

La Figura 35 muestra la proyección de la producción potencial de SAF a partir de aceites vegetales residuales. Considerando que no hay factores políticos o económicos que afecten significativamente su tendencia de crecimiento, se estima que el potencial máximo teórico de SAF alcanzaría los 234 kt, 263 kt y 292 kt para el 2030, 2040 y 2050, respectivamente. Si los niveles de recolección de aceite no cambian, el potencial más probable se estima en 0.15 kt, 0.16 kt y 0.18 kt para esos años.

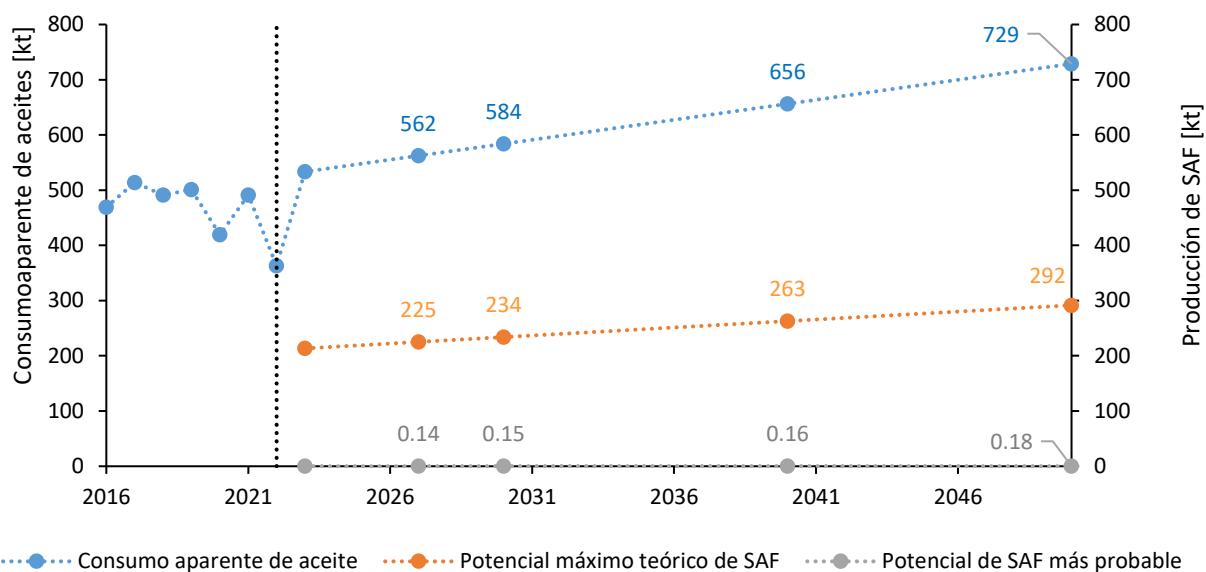


Figura 35. Proyección de la producción máxima teórica, y más probable de SAF a partir de aceites vegetales residuales.

Factores de sostenibilidad

Emisiones de GEI

Como ocurre con cualquier otro tipo de desechos, residuos y subproductos, la metodología CORSIA de la OACI asume que no se generan emisiones durante la producción de materia prima, pero se incluirán las generadas durante la recolección, recuperación, extracción y procesamiento de estos residuos. Tampoco se atribuyen emisiones por ILUC, asignándoseles, por tanto, un valor de cero en el cálculo de dicho valor.

Las emisiones de CO₂ de la producción de SAF de aceites vegetales residuales dependen en gran medida de la eficiencia de recolección. De momento, se toma el valor por defecto para la conversión de aceite residual mediante coprocesado de 16.7 gCO₂eq/MJ (el más alto para esta ruta de conversión), lo que conlleva un potencial de mitigación del 81% respecto al Jet-A1.

Otros aspectos ambientales

No se espera que el aprovechamiento de los aceites vegetales residuales para la producción de SAF implique incidencias en el uso o calidad del agua, el uso del suelo, la contaminación del aire o la biodiversidad. Asimismo, aquellos emprendedores que quieran aprovechar este recurso deben asegurarse de que las nuevas instalaciones no generen (o minimicen) residuos químicos peligrosos o impactos sísmicos o vibracionales.

Aspectos socioeconómicos

Aquellos emprendedores que quieran aprovechar los aceites vegetales residuales para la producción de SAF deben asegurarse de cumplir los requerimientos socioeconómicos establecidos por la OACI (ver Anexo A3). No se espera que esta ruta de conversión implique incidencias en derechos sobre tierras, uso de agua comunitario o la seguridad alimentaria. De hecho, la recolección y transformación de aceites vegetales residuales puede mejorar el medioambiente y generar empleos.

Factores económicos

Las tendencias en torno al PMV del SAF producido mediante el coprocesado de aceites vegetales residuales son iguales a las mostradas en la Figura 30 y Figura 31 para aceites vegetales, respectivamente. Un estudio señala que la recolección de 1 kt de aceites vegetales residuales genera aproximadamente 0.783 empleos directos (Klenert et al., 2025). Con base en esta relación, se estima que el aprovechamiento del potencial máximo teórico de SAF en 2050 podría generar alrededor de 294 empleos directos. No obstante, considerando el potencial más probable, esta cifra se reduciría drásticamente a 2 empleos directos. No se tiene noción de la generación de empleo indirecto involucrado en la transformación.

Evaluación general

La Tabla 7 resume los resultados en torno a la evaluación de la producción potencial de SAF a partir de aceites vegetales residuales. La tecnología para la conversión está disponible a nivel comercial. Si todo el aceite residual fuese usado para la producción de SAF, el máximo potencial teórico sería suficiente para reemplazar el consumo actual de Jet-A1 en un 21%.

Se espera que el SAF a partir de aceites vegetales residuales cumpla con todos los criterios de sostenibilidad definidos por la OACI. Por otra parte, la viabilidad económica de la producción de SAF a partir de este recurso, es la misma que la expuesta para el caso de usar otros aceites vegetales (ver sección 2.3.4).

De acuerdo con los resultados en torno a la evaluación de disponibilidad de materias primas, la producción de SAF a partir de aceites vegetales residuales requiere de:

- Desarrollar mecanismos para la logística de recolección de la materia prima.
- Identificar alternativas específicas para reducir la incertidumbre en torno a la provisión del aceite residual.
- Redactar borradores de los documentos necesarios para obtener los permisos ambientales pertinentes.
- Llevar a cabo estudios para una estimación más certera de las emisiones de GEI del SAF a partir de aceites vegetales residuales en base a su ciclo de vida.

2.3.7 Cultivos bioenergéticos

Disponibilidad de materia prima

La Figura 36 muestra la distribución de superficies marginales en el país debido a sus condiciones climáticas (terrenos áridos), las cuales podrían ser empleadas para el cultivo de bioenergéticos, es decir, plantaciones que se adaptan a terrenos no aptos para la agricultura, como microalgas, hierba napier (*Cenchrus purpureus*, también conocido como pasto elefante), sorgo o *Jatropha curcas*.

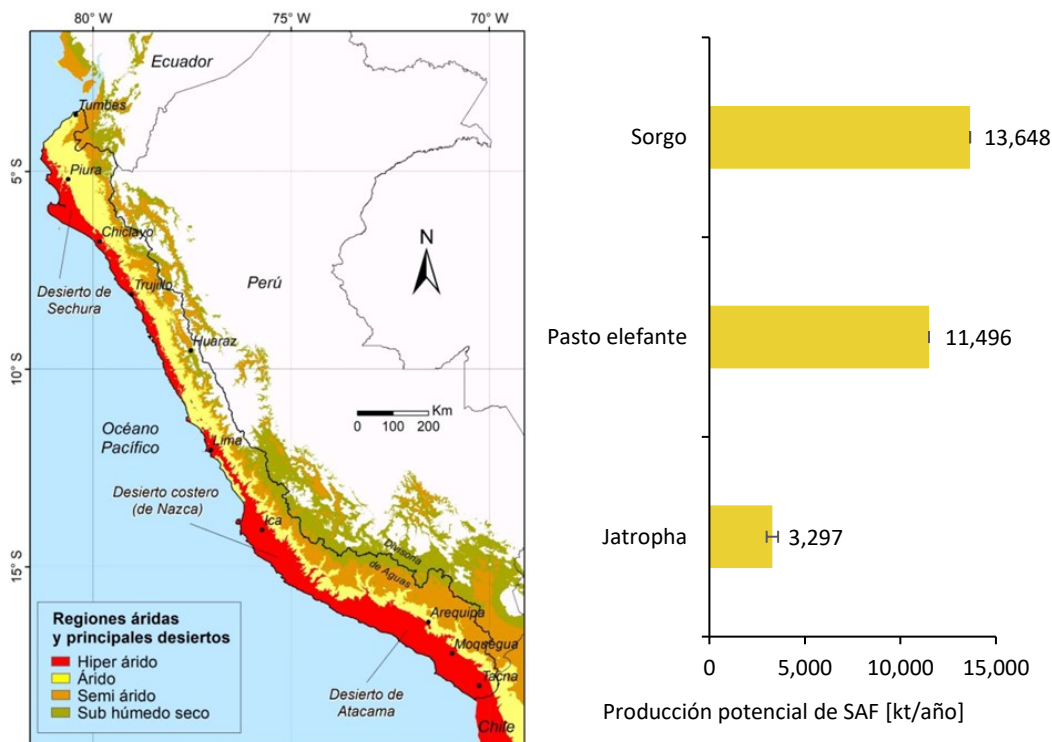


Figura 36. Distribución de tierras secas en el Perú (Rau, 2019) y potencial de producción de SAF en regiones áridas y semiáridas a partir de jatropha, pasto elefante o sorgo.

Las microalgas son microorganismos fotosintéticos unicelulares con un enorme potencial para la producción sostenible de biocombustibles. Gracias a su alta eficiencia fotosintética y capacidad para acumular grandes cantidades de lípidos, pueden ser transformadas en biodiésel, bioetanol o biogás, sin competir directamente con cultivos alimentarios. Además, su cultivo puede realizarse en aguas residuales o terrenos no aptos para la agricultura, lo que mejora su viabilidad ambiental y económica. Las especies *Chlorella vulgaris* y *Nanochloropsis* destacan en particular por su productividad lipídica. Sin embargo, se requieren aún avances tecnológicos en escalado, nutrición y cosecha para maximizar su rentabilidad (Bora et al., 2024; García Romeral et al., 2017).

El pasto elefante o hierba de elefante es una gramínea de rápido crecimiento y alto rendimiento, considerada una de las biomásas más prometedoras para la producción de biocombustibles, especialmente etanol y biocarbón. Gracias a su abundante contenido de celulosa y hemicelulosa, puede ser transformada en azúcares fermentables mediante procesos de pretratamiento y sacarificación enzimática. Más información sobre el pasto elefante puede ser encontrada en otras fuentes (Mohammed et al., 2019).

El sorgo (*Sorghum*) es un cultivo energético versátil con gran potencial en la producción de biocombustibles, especialmente bioetanol. Su alta tolerancia a condiciones adversas como sequía y suelos pobres lo convierte en una opción viable en regiones donde otros cultivos no prosperan. En particular, el sorgo dulce contiene altos niveles de azúcares fermentables en su jugo, lo que lo hace ideal para la producción de etanol. Más información sobre el sorgo puede ser encontrada en otras fuentes (Appiah-Nkansah et al., 2019).

La jatropha es una planta oleaginosa no comestible con gran potencial para la producción de biodiésel debido al alto contenido de aceite en sus semillas (hasta un 37%). Puede cultivarse en suelos marginales, secos y

poco fértiles, lo que la hace ideal para regiones con limitados recursos agrícolas. Su aceite, rico en ácidos grasos monoinsaturados y poliinsaturados, es apto para su conversión en biodiésel de buena calidad u otros biocombustibles (Campuzano-Duque & Cardeño-López, 2020). Además, es posible usar otras partes de su fruto para la producción de biocombustibles sólidos como pellets. Más información sobre la jatropha puede ser encontrada en otras fuentes (Navarro-Pineda et al., 2016).

La Tabla 12 resume los supuestos en torno a la productividad de biomasa y su potencial de producción de SAF. De lejos, la microalga presenta la mayor productividad de SAF por unidad de superficie; sin embargo, la posibilidad de su implementación para la producción de biocombustibles sigue siendo muy limitada debido a aspectos tecno-económicos. Por otra parte, la implementación de otros cultivos energéticos podría darse en regiones áridas o semiáridas con extensiones de hasta 190 308 km². Asumiendo que toda esta superficie fuese empleada y considerando los potenciales de SAF mostrados en la Tabla 12, los potenciales teóricos de SAF a partir de los cultivos bioenergéticos oscilan entre los 3 297 y los 13 648 kt/año. Aunque altos, este potencial está limitado por la disponibilidad de suelos. Además, la opción del cultivo de bioenergéticos tiene un alto grado de incertidumbre, dado que se requieren estudios de campo para corroborar los supuestos en torno a la productividad en campo y composición de biomasa.

Tabla 12. Características de la producción de bioenergéticos potenciales en el Perú.

Cultivo	Productividad de biomasa [t/ha/año]	Contenido de azúcares/lípidos	Vía de conversión a SAF	Potencial de SAF [t/ha/año]	Referencias
Microalga	47	30 – 50%	HEFA	11.10 – 18.50	(IEA Bioenergy, 2017)
Jatropha	1	20 – 24%	HEFA	0.16 – 0.19	(Brittaine & Litaladio, 2010)
Pasto elefante	10.83	28%	ATJ	0.60	(Aleme et al., 2024)
Sorgo	15	24%	ATJ	0.72	(Bassam, 1997)

De entre todos los bioenergéticos potenciales, se espera que el sorgo sea aquel con mayor viabilidad para la producción de SAF mediante el proceso ATJ y, por tanto, el que presenta más probabilidades de desarrollarse a escala comercial. Actualmente, existen cerca de 69 ha de cultivo de sorgo en Arequipa destinadas a la alimentación animal (Figura 8), lo que evidencia un conocimiento agronómico y una infraestructura básica ya disponible para su expansión.

Los cultivos de jatropha se excluyen del presente análisis debido a los reiterados fracasos en su implementación a gran escala en Perú y en otras regiones con condiciones agroclimáticas similares, asociados a bajos rendimientos, alta variabilidad productiva y dificultades en la gestión agronómica (Kant & Wu, 2011). Por su parte, los cultivos de pasto elefante se descartan ante la ausencia de datos estadísticos oficiales sobre su producción en el país, así como por el desconocimiento técnico y la falta de experiencia local en su manejo a gran escala.

Si todas las tierras secas potencialmente aptas fueran destinadas al cultivo de sorgo, el máximo potencial de producción de SAF alcanzaría aproximadamente 13 648 kt. Sin embargo, si la producción de SAF se da con la producción de las superficies de cultivo existentes, se obtendría una elaboración de 0.05 kt. Sería necesaria una producción mínima de 53 kt de SAF para equivaler el requerimiento de capacidad instalada de referencia

para una planta de ATJ pionera. Esta producción requeriría del establecimiento de unas 73 903 ha de sorgo, es decir, aproximadamente la superficie cubierta por las actuales plantaciones de caña de azúcar para fines alimenticios en el país. De 2016 a 2022, los cultivos de caña para etanol aumentaron en un 42%; asumiendo un incremento similar a 2050, se estima que la producción de SAF a partir de sorgo para ese año ascendería a unos 75 kt.

Factores de sostenibilidad

Emisiones de GEI

No hay disponible un factor de emisión por defecto para la producción de SAF mediante el proceso ATJ mediante sorgo. La caña de azúcar tiene un rendimiento de SAF de 1.93 t/ha y un factor de emisión de 24.1 gCO₂eq/MJ, mientras que el rendimiento del sorgo es estimado en 0.72 t/ha. Basándose en ese valor y en las diferencias en productividades, las emisiones de GEI del SAF a partir de sorgo se estiman en 64.6 gCO₂eq/MJ, lo que implica un potencial de mitigación del 27%. Este resultado debe evaluarse a detalle, por lo que se necesitan más estudios para ello. El cultivo de sorgo en terrenos áridos puede, incluso, conllevar créditos de carbono por concepto de cambio de uso del suelo, lo que depende de su uso actual.

Otros aspectos ambientales

No se espera que la producción de SAF implique afectaciones en el uso del suelo, uso y calidad del agua y la biodiversidad, asumiendo que los cultivos se dan en suelos áridos y marginales. Sin embargo, esa situación puede cambiar en el caso de la adición de nuevos cultivos realizados en zonas deforestadas (aunque el cultivo no sea directamente responsable por ello). Por tanto, es necesario generar un sistema de trazabilidad en torno al uso de la tierra y el cambio de uso del suelo.

Aquellos emprendedores que quieran producir SAF a partir de cultivos bioenergéticos deben asegurarse de que las nuevas instalaciones no generen (o minimicen) residuos químicos peligrosos o impactos sísmicos o vibracionales.

Aspectos socioeconómicos

Aquellos emprendedores que quieran producir SAF a partir de cultivos bioenergéticos deben asegurarse de cumplir los requerimientos socioeconómicos establecidos por la OACI (ver Anexo A3). No se espera que esta ruta de conversión implique incidencias en derechos sobre tierras, uso de agua comunitario o la seguridad alimentaria si los cultivos se realizan en suelos marginales. De ser el caso, la implementación de nuevos cultivos puede generar empleos en el sector agrario.

Factores económicos

El PMV del SAF producido a partir de sorgo tendría la misma tendencia que en el caso del etanol a partir de caña de azúcar (Figura 26). De esta manera, sería conveniente estimar el precio de la producción de etanol a partir de sorgo y usarlo como referencia. El precio de dicho etanol debe ser menor a los PEN 2 120/t para que el PMV del SAF sea menor al precio del Jet-A1 en aeropuertos bajo un periodo de evaluación de 20 años y asumiendo una tasa de rentabilidad del 10% sobre la inversión. Si se desea obtener rendimientos económicos similares en un periodo de evaluación de 15, 10 o 5 años, el precio del etanol debe descender a PEN 2 034/t (≈USD 576/t), PEN 1 889/t (≈USD 535/t) y a PEN 1 645/t (≈USD 466/t), respectivamente. Más estudios son necesarios para estimar el precio del SAF a partir de sorgo.

Evaluación general

La Tabla 7 resume los resultados en torno a la evaluación de la producción potencial de SAF a partir de sorgo. Aunque la tecnología está avanzada, aún se encuentra en etapas de demostración de prototipos. Si toda la superficie árida fuese empleada para el cultivo de sorgo con fines bioenergéticos, la producción total de SAF sería suficiente para cubrir todos los requerimientos de Jet-A1 en el país e incluso generar un superávit del 1 262%. Sin embargo, un escenario más probable contempla solo la producción requerida para cubrir la capacidad instalada de referencia para plantas pioneras, cubriendo los requerimientos de Jet-A1 en un 5.3%.

Se espera que el SAF a partir de sorgo cumpla con todos los criterios de sostenibilidad definidos por la OACI, a menos que los cultivos se den en suelos convertidos después del 2008, en cuyo caso, se debe realizar una estimación de las emisiones por concepto de cambio de uso del suelo y asignar el valor correspondiente.

En cuanto a la factibilidad, su viabilidad económica depende del precio del etanol de sorgo que, a su vez, depende de factores como el rendimiento en campo, lo que es una situación similar a la expuesta para el caso de la transición de etanol de caña de azúcar a SAF (ver sección 2.3.3).

De acuerdo con los resultados en torno a la evaluación de disponibilidad de materias primas, la producción de SAF a partir de sorgo requiere de:

- Definir rangos de adaptación para la producción de sorgo e identificar la incertidumbre en sus rendimientos agrícolas (los resultados actuales se basan en datos de referencias científicas).
- Realizar una estimación más certera de los costos de campo y su transformación a SAF.
- Redactar borradores de los documentos necesarios para obtener los permisos ambientales pertinentes.
- Evaluar los impactos en torno a la producción agrícola y su desempeño económico y ambiental.

2.3.8 Residuos pecuarios: estiércoles vacuno, avícola y porcino.

Disponibilidad de materia prima

La Figura 37 muestra la evolución histórica de la producción en los sectores avícola, porcino y vacuno en el Perú. Entre los años 2010 y 2023, la producción de aves aumentó en más del 55%, consolidándose como la principal fuente de carne en el país. En cuanto a la carne de porcino, pasó de 150 mil toneladas en 2010 a 254 mil toneladas en 2023, mostrando un crecimiento constante de alrededor del 69% en el periodo, con un ritmo sostenido especialmente desde 2015. Por otro lado, la producción de carne de vacuno tuvo una evolución más estable, aumentando de 491 mil toneladas en 2010 a 547 mil toneladas en 2023, lo que representa un crecimiento cercano al 11%. En resumen, el crecimiento más marcado se dio en la producción avícola, seguida de la porcina, mientras que la producción bovina creció a un ritmo más moderado.

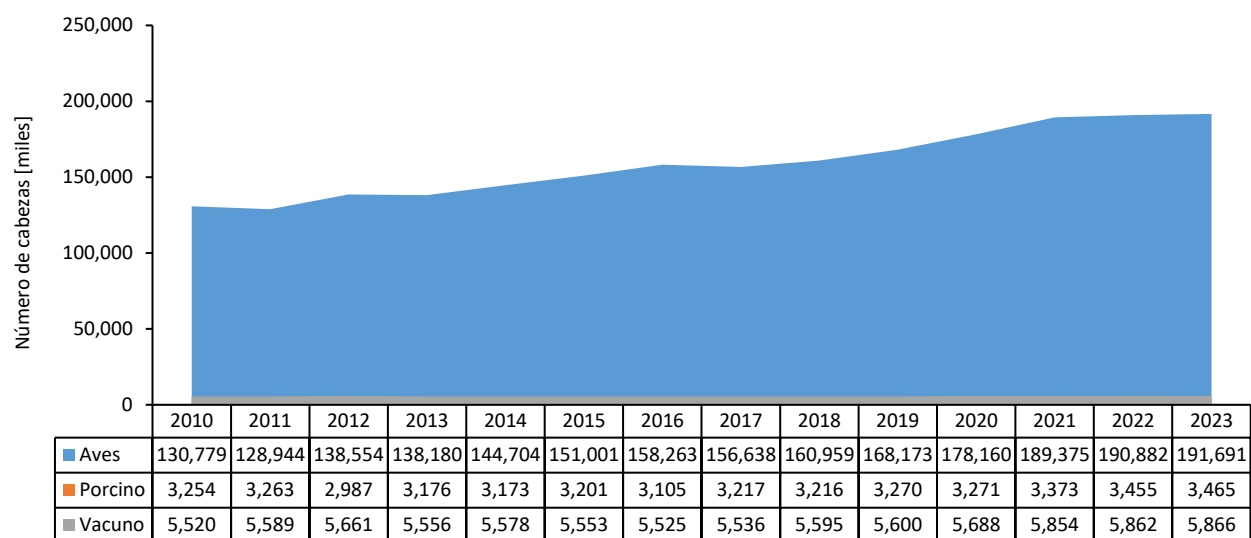


Figura 37. Número de cabezas en el sector avícola, porcino y vacuno en el Perú. Datos de MIDAGRI (2025).

La Figura 38 muestra la distribución de la producción del sector avícola, porcino y vacuno en el Perú en 2023. Cerca de la mitad de la producción del sector avícola se concentra en Lima, mientras que el remanente está distribuido homogéneamente a lo largo del país. Por otra parte, la distribución del sector porcino está homogéneamente distribuida en el país, con Lima concentrando la mayor producción, con un 15% sobre el total. Una situación similar ocurre con el sector vacuno, el cual presenta su mayor concentración en Puno (13%), seguido por Cajamarca (11%) y Cusco (8%).

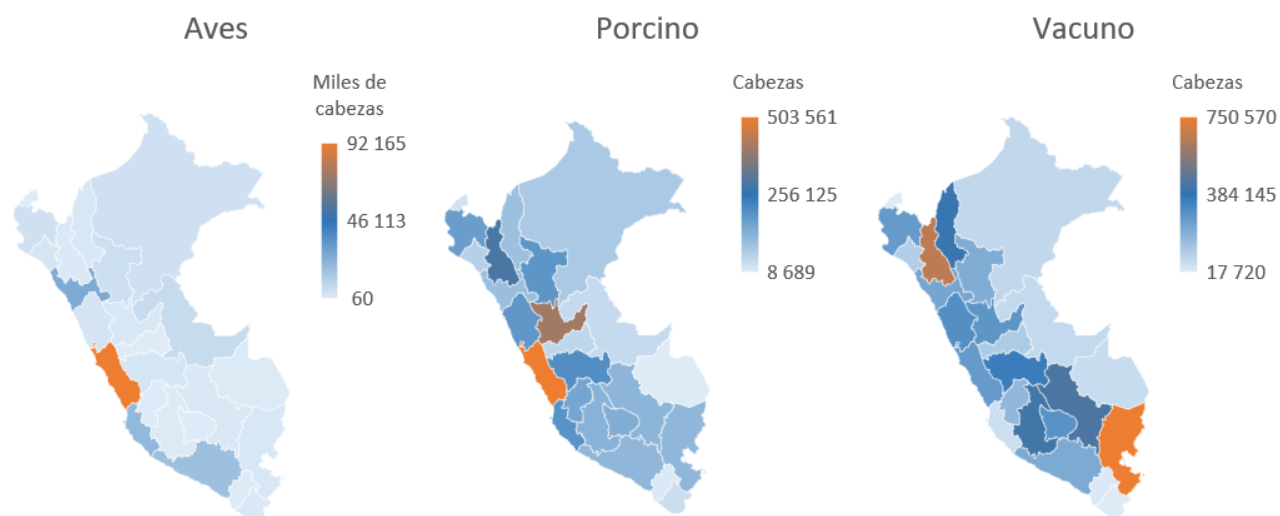


Figura 38. Distribución de la producción del sector avícola, porcino y vacuno en el Perú en 2023. (MIDAGRI, 2025).

La estimación del potencial de SAF a partir de residuos pecuarios es calculada de manera similar al caso de los residuos urbanos o agrícolas, es decir, considerando su humedad y contenido energético, tal como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13. Fórmulas aplicadas en este estudio (cálculo propio) para la estimación de la producción potencial de SAF a partir de residuos pecuarios.

Eq.	Fórmula	Abreviaciones
(9)	$Q_{SAF,RP} = \frac{E_{ff,RPE} \times \sum [Q_{rp,i} \times FRP_i \times (1 - H_{rp,i}) \times PCI_{RP,i}]}{PCI_{SAF}}$	<ul style="list-style-type: none"> • $Q_{SAF,RP}$, la cantidad estimada de SAF a partir de residuos pecuarios [kt]. • $E_{ff,RPE}$, la eficiencia de transformación de residuo pecuario a SAF [MJ/MJ]. Se asume en 0.50 MJ/MJ. • $Q_{rp,i}$, cantidad del i-ésimo recurso pecuario susceptible para la producción de SAF [kt]. • $H_{rp,i}$, humedad del i-ésimo residuo pecuario susceptible para la producción de SAF [%] (ver Tabla 14). • $PCI_{RP,i}$, poder calorífico inferior del i-ésimo residuo pecuario susceptible para la producción de SAF [MJ/kt] (ver Tabla 14). • PCI_{SAF}, poder calorífico inferior del SAF [MJ/kt]. Se asume un valor de 42.8 MJ/kg (Boehm et al., 2022).

La Tabla 14 muestra la estimación potencial de la producción de SAF a partir de residuos pecuarios (estiércol vacuno, avícola y porcino) en el Perú, considerando datos de 2023. Dicho potencial está considerando únicamente los estiércoles vacuno, avícola y porcino entre los diferentes residuos que se generan en la actividad pecuaria. El residuo vacuno es el que representa mayor potencial con 2 589 kt (65%), seguido por el residuo avícola con 1 160 kt (29%) y el porcino con 213 kt.

Tabla 14. Estimación del potencial de producción de SAF a partir de residuos pecuarios en el Perú considerando datos de 2023.

Parámetro	Unidades ^a	Generación de residuo [kg/unidad/día] ^b	Humedad en residuo [%]	Producción de residuo [kt/año]	PCI del residuo [MJ/kg]	Potencial de SAF [kt/año]
Ave (miles)	191 691	0.18	50%	6 297	15.77	1 160
Vacuno	5 866 168	10	50%	10 706	20.7	2 589
Porcino	3 465 175	2.25	50%	1 423	12.83	213
Total	—	—	—	18 135	—	3 962

^a Datos de (MIDAGRI, 2025).

^b Datos de (Reyes Chávez & Barrenechea Ramírez, 2022).

La Figura 39 muestra la proyección de la generación de residuos pecuarios en el Perú considerando los datos históricos desde 2007 a 2023, asumiendo que no hay factores políticos o económicos que afecten significativamente su tendencia de crecimiento. Bajo estos supuestos, se estima que la producción potencial máxima teórica de SAF a partir de residuos pecuarios alcance los 4 201 kt, 4 581 kt y 4 962 kt para 2030, 2040 y 2050, respectivamente. Sin embargo, en un escenario más factible, se esperaría que el potencial más probable de SAF sea equiparable al de la capacidad instalada de referencia para plantas FT, alcanzando una producción de 117 kt de SAF para 2030, que se incrementaría conforme lo hace la generación de residuo a 128 kt para 2040 y a 138 kt para 2050.

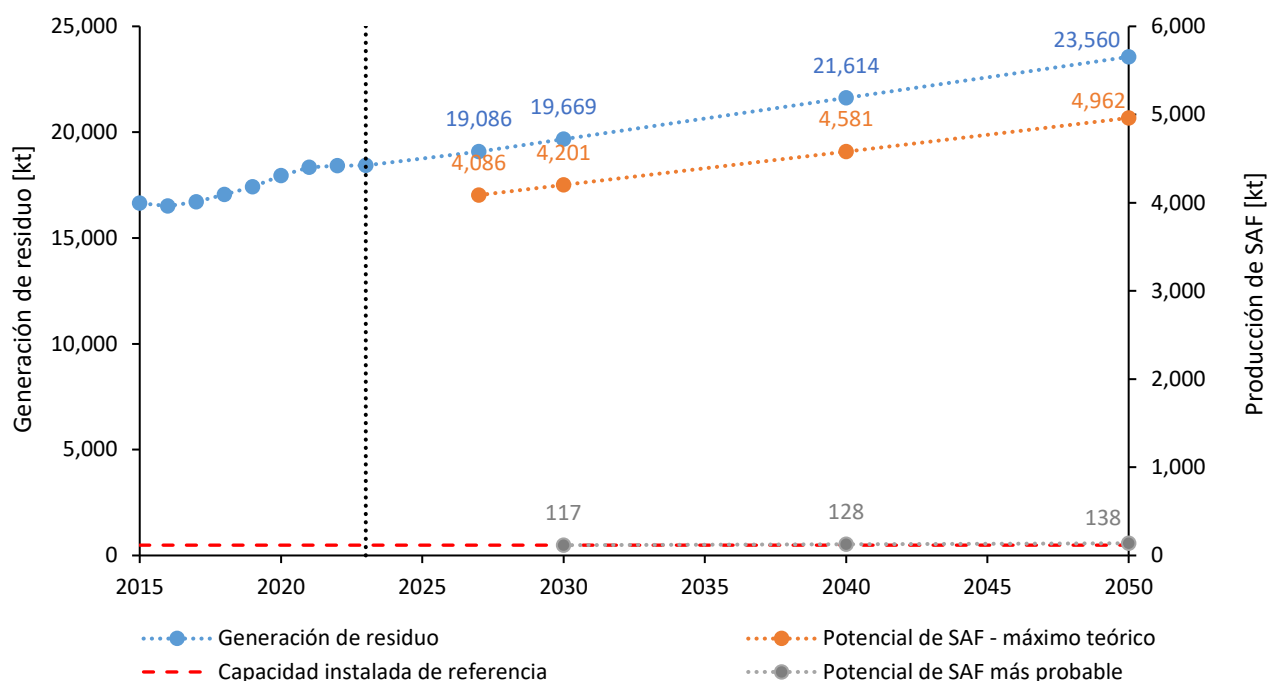


Figura 39. Proyección de la producción potencial de SAF en el Perú a partir de residuos pecuarios.

Factores de sostenibilidad

Emisiones de GEI

Los estiércoles están incluidos en la lista positiva de materiales clasificados como coproductos, residuos, desechos o subproductos del documento de la OACI “*Valores predeterminados de emisiones del ciclo de vida de CORSIA para combustibles elegibles*”. Bajo la metodología CORSIA, se asume que, en el caso de esos materiales, no se generan emisiones durante la producción de materia prima. Sin embargo, se incluirán las emisiones generadas durante la recolección, recuperación, extracción y procesamiento de estos desechos, residuos y subproductos. Tampoco se atribuyen emisiones por ILUC, asignándoseles, por tanto, un valor de cero en el cálculo de dicho valor.

Las emisiones de CO₂ derivadas del aprovechamiento de residuos pecuarios se calculan igual a como se calculan las emisiones de la producción de SAF a partir de RSU, considerando un nulo contenido de carbono no biogénico en la materia prima. De esta manera, el factor de emisión de GEI del SAF a partir de residuos pecuarios se estima en 5.2 g CO₂eq/MJ.

Otros aspectos ambientales

No se espera que el aprovechamiento de los residuos pecuarios para la producción de SAF implique incidencias en el uso o calidad del agua, el uso del suelo, la contaminación del aire o la biodiversidad. Asimismo, aquellos emprendedores que quieran aprovechar dichos residuos deben asegurarse de que las nuevas instalaciones no generen (o minimicen) residuos químicos peligrosos o impactos sísmicos o vibracionales.

Aspectos socioeconómicos

Aquellos emprendedores que quieran aprovechar los residuos pecuarios para la producción de SAF deben asegurarse de cumplir los requerimientos socioeconómicos establecidos por la OACI (ver Anexo A3). No se

espera que esta ruta de conversión implique incidencias en derechos sobre tierras, uso de agua comunitario o la seguridad alimentaria. De hecho, la recolección y transformación de residuos pecuarios puede generar empleos.

Factores económicos

Dado que se asume que la tecnología de transformación de los RSU a SAF puede emplearse para la transformación de los pecuarios en SAF, se espera que su desempeño económico sea similar. Por tanto, el PMV del SAF a partir de residuos pecuarios dependerá en gran parte del precio de la materia prima (ver sección 2.3.1).

No se tienen datos respecto a la generación de empleo para la recolección de residuos pecuarios. Sin embargo, asumiendo que los requerimientos de empleo de esta actividad son los mismos que para la recolección de RSU (1.73 empleos directos por kt), la producción de SAF a 2050 bajo el potencial máximo teórico y más probable generaría 39 884 y 1 114 empleos directos, respectivamente.

Evaluación general

La Tabla 7 resume los resultados en torno a la evaluación de la producción potencial de SAF a partir de residuos pecuarios en el Perú. Si todo el residuo pecuario fuese recolectado y empleado para la producción de SAF, sería posible reemplazar el consumo actual de Jet-A1 y crear un superávit del 296%.

Se espera que el SAF a partir de RSU cumpla con todos los criterios de sostenibilidad definidos por la OACI y que su factibilidad económica dependa del precio del residuo, es decir, de su recolección y tratamiento previo para su transformación, el cual, bajo los supuestos de este estudio, se estima que debe ser inferior a los PEN 133/t para que el precio al público del SAF (sin incluir su distribución) sea equivalente al del Jet-A1 en aeropuertos y el sistema alcance una rentabilidad del 10% sobre la inversión al cabo de 20 años.

De acuerdo con los resultados en torno a la evaluación de disponibilidad de materias primas, la producción de SAF a partir de RSU requiere de:

- Definir el rango de adaptación de la materia prima y la incertidumbre en torno a su producción.
- Vincular a los centros de generación de los residuos pecuarios con los corredores de materias primas para abastecer a las instalaciones que las aprovecharían para la producción de SAF.
- Redactar borradores de los documentos necesarios para obtener los permisos ambientales pertinentes.
- Evaluar otros riesgos implícitos del aprovechamiento de la materia prima y desarrollar un protocolo de contingencia.

2.3.9 Gases de chimenea

Disponibilidad de materia prima

La Figura 40 muestra la estimación de las emisiones de GEI derivada de procesos industriales y de la generación de electricidad en el Perú. Esta estimación fue realizada considerando las emisiones de CO₂ de los rubros de *industrias de energía y procesos industriales y uso de productos* del inventario nacional de emisiones de GEI del Perú y un prorrateo del 69% y 87% a la generación de electricidad y a procesos industriales, respectivamente (MINAM, 2023).

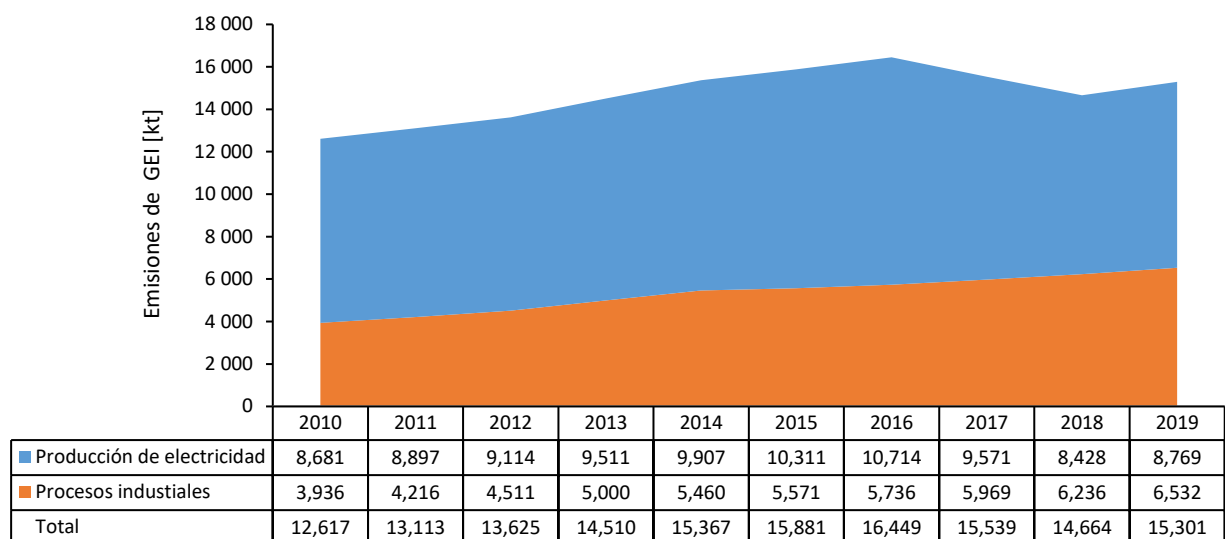


Figura 40. Estimación de las emisiones de GEI derivadas de procesos industriales y generación de electricidad en el Perú. Datos de MINAM (2023).

Asumiendo un crecimiento lineal, se estima que las emisiones totales por concepto de gases de chimenea alcanzan unos 20 408 kt de CO₂ para el 2024, lo que es suficiente para producir 3 872 kt de SAF considerando una relación CO₂/SAF de 5.27 t/t. La Figura 41 muestra la proyección de la producción potencial de SAF en el Perú a partir de gases de chimenea, asumiendo que no hay factores políticos o económicos que afecten significativamente su tendencia de crecimiento. Bajo estos supuestos, se estima que la generación de RSU para 2030, 2040 y 2050 ascienda a 4 581 kt, 5 762 kt y 6 943 kt, respectivamente. Sin embargo, en un escenario más probable, la producción de SAF se espera que sea la necesaria para cubrir la capacidad técnica de referencia de una planta basada en la tecnología PTL de 160 kt de SAF/año (ICAO, 2025c), e iría incrementándose hasta los 201 kt y 243 kt para el año 2040 y 2050, respectivamente.

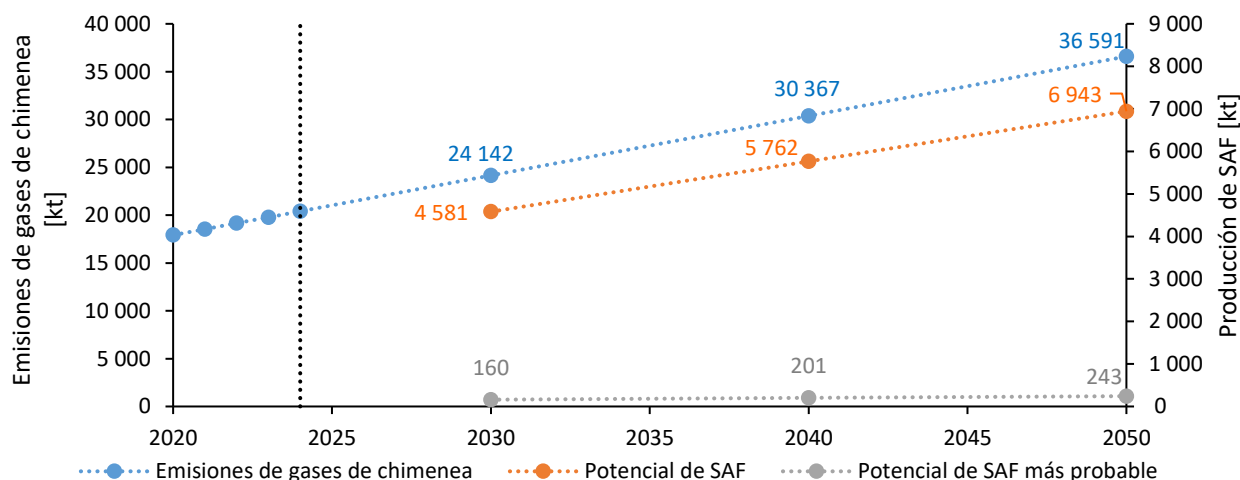


Figura 41. Proyección de la producción potencial de SAF en el Perú a partir de gases de chimenea.

Factores de sostenibilidad

Emisiones de GEI

Los gases de chimenea, al considerarse un desecho, bajo la metodología CORSIA de la OACI, se asume que no generan emisiones durante su producción, pero se incluirán las generadas durante su recolección, recuperación, extracción y procesamiento. Tampoco se atribuyen emisiones por ILUC, asignándoseles, por tanto, un valor de cero en el cálculo de dicho valor. Las emisiones de GEI de la producción de SAF a partir de gases de chimenea dependen de la naturaleza del gas y las condiciones de instalación. Sin embargo, estas pueden ser estimadas en 42.40 g CO₂eq/MJ, que corresponden al máximo valor para esta materia prima definida en los valores predeterminados por la OACI (ICAO, 2021).

Otros aspectos ambientales

No se espera que el aprovechamiento de los gases de chimenea para la producción de SAF implique incidencias en el uso o calidad del agua, el uso del suelo, la contaminación del aire o la biodiversidad. Asimismo, aquellos emprendedores que quieran aprovechar dichos gases deben asegurarse de que las nuevas instalaciones no generen (o minimicen) residuos químicos peligrosos o impactos sísmicos o vibracionales.

Aspectos socioeconómicos

Aquellos emprendedores que quieran aprovechar los gases de chimenea para la producción de SAF deben asegurarse de cumplir los requerimientos socioeconómicos establecidos por la OACI (ver Anexo A3). No se espera que esta ruta de conversión implique incidencias en derechos sobre tierras, uso de agua comunitario o la seguridad alimentaria.

Factores económicos

El PMV del SAF producido a partir del aprovechamiento de gases de chimenea dependerá de la eficiencia del sistema de captura de carbono y la concentración de CO₂ en el gas, en otras palabras, del costo de captura del gas. No se encontró una herramienta que permitiese estimar el PMV considerando las condiciones del Perú o los supuestos de este estudio. Sin embargo, según las reglas por defecto establecidas por la OACI, el PMV del SAF de gases de chimenea, sin especificar su origen, es de USD 3.5/l (unos PEN 49.02/gal) (ICAO, 2025c). Un estudio indica que, en el caso de gases de chimenea de industrias acereras, el PMV del SAF alcanza EUR 1 150/ton (unos PEN 22.58/gal) (Elliott et al., 2024). Más estudios serían necesarios para establecer una estimación en el PMV del SAF a partir de gases de chimenea en el Perú.

Teniendo en cuenta las ecuaciones en la Tabla 6, la generación de empleos directos para la producción de SAF a partir de gases de chimenea asciende a los 4 y 8 bajo el potencial máximo teórico y más probable, respectivamente. No hay noción de la generación de empleos indirectos.

Evaluación general

La Tabla 7 resume los resultados en torno a la evaluación de la producción potencial de SAF a partir de gases de chimenea. La tecnología de captura de CO₂ es bien conocida pero aún no está disponible a escala comercial. Si todos los gases de chimenea fuesen recolectados y empleados para la producción de SAF, sería posible reemplazar el consumo actual de Jet-A1 en un 387%.

Se espera que el SAF a partir de gases de chimenea cumpla con todos los criterios de sostenibilidad definidos por la OACI. Sin embargo, su aplicación en la práctica queda limitada debido a los altos costos de capital e instalación, lo que se refleja en un alto PMV del SAF resultante.

De acuerdo con los resultados en torno a la evaluación de disponibilidad de materias primas, la producción de SAF a partir de gases de chimenea requiere de:

- Definir un rango de adaptación del acoplamiento de los sistemas de captura de carbono e identificar incertidumbres en su funcionamiento.
- Identificar alternativas específicas para reducir la incertidumbre tecno-económica.
- Identificar programas especiales de incentivos para el acoplamiento de sistemas de captura de carbono.
- Determinar el potencial de resistencia entre las empresas que generan los gases de chimenea.

SECCIÓN 3. MECANISMOS DE APOYO Y FINANCIAMIENTO

En el Perú, el fomento de la industria de biocombustibles se ha caracterizado por un modelo que prioriza un mercado cautivo respecto a la provisión de financiamiento por el Estado. De hecho, el rol del gobierno ha sido principalmente normativo, estableciendo un marco regulatorio que sirve para impulsar y facilitar la inversión privada y multilateral en materia de biocombustibles. De esta manera, la ley N.º 28054 para la *Promoción del Mercado de Biocombustibles* ha generado una demanda predecible y garantizada de etanol y biodiésel mediante cronogramas de mezclas obligatorias con combustibles fósiles (MINAM, 2017). Esta certidumbre de mercado ha sido decisiva para que instituciones financieras de desarrollo y la banca privada cofinancien proyectos a gran escala, como el préstamo de USD 149 millones por un consorcio de bancos para el desarrollo de biocombustibles en 2010 (BDALC, 2011). Este mismo marco podría aplicarse también a la industria de SAF.

La Tabla 15 resume algunas fuentes potenciales para apoyo y financiamiento para el desarrollo de la industria de SAF en el Perú. A nivel local, el gobierno cuenta con canales para apoyo en forma de subsidios otorgados por concurso o asistencia técnica. Dichos canales pueden ser empleados para modelos de negocio concernientes a la recolección eficiente de RSU o aceites residuales para su transformación en SAF. Otros mecanismos internacionales, como los fondos para la financiación de acción y/o adaptación al cambio climático, también están disponibles.

Tabla 15. Resumen de algunas fuentes potenciales para apoyo y financiamiento del desarrollo de la industria de SAF.

Proyectos	Entidad	Instrumento	Descripción	Referencias
Concurso de emprendedores por naturaleza	Gobierno peruano - MINAM	Subsidios	Concurso con un monto total de PEN 4 millones, para la promoción y fortalecimiento de emprendimientos basados en el aprovechamiento sostenible de recursos	(MINAM, 2025b)
Fondos verdes	Gobierno peruano - MINAM	Asistencia técnica	Canalización de recursos financieros para la implementación de medidas que mitiguen impactos ambientales	(MINAM, 2021c)
Green adaptation fund	CMNUCC	Financiamiento	Principal fondo global para financiar la acción climática en países en desarrollo	(Adaptation Fund, 2024)
Green climate fund	CMNUCC	Financiamiento	Principal fondo global para financiar a países en desarrollo en la mitigación de emisiones y la adaptación a los impactos del cambio climático	(Green Climate Fund, 2025)
Préstamos para el desarrollo de industria energética	Banco de desarrollo de América Latina y el Caribe	Financiamiento	Es una institución financiera multilateral que fomenta el desarrollo sostenible y la integración regional de sus países miembros	(CAF, 2025)

Proyectos	Entidad	Instrumento	Descripción	Referencias
Clean Technology Fund	World Bank Group	Financiamiento	Apoyo al escalamiento de tecnologías bajas en carbono en países en desarrollo	(WBG, 2025)

El alto precio del SAF (relativo a la alternativa fósil) es el principal obstáculo para el desarrollo de la industria. Desde el punto de vista de productores o comerciantes de combustibles, este factor sería una barrera para que empresas consumidoras (especialmente aerolíneas) demanden SAF, puesto que el combustible compromete considerablemente sus costos [aproximadamente un 30% (IATA, 2025)], reduciendo el incentivo y certidumbres necesarios para el desarrollo de la oferta del biocombustible.

Por otro lado, empresas potencialmente consumidoras de SAF no plantean estrategias para su incorporación dentro de sus planes de descarbonización, puesto que ni siquiera encuentran proveedores constantes o con una capacidad de producción lo suficientemente grande. Esta situación no es exclusiva del Perú y, de hecho, parece ser común en los países que desean la implementación del SAF dentro de su sector de aviación.

Es necesaria, por tanto, la intervención estatal para impulsar el desarrollo de la industria de SAF. La Tabla 16 resume algunas políticas que pueden potenciar el desarrollo de la industria de SAF. La OACI ofrece una guía completa sobre políticas de combustibles de aviación sostenibles (SAF) a través de su *ICAO Guidance on Policy Measures for SAF Development and Deployment* (ICAO, 2025b) (documento únicamente en inglés).

Este documento proporciona a los Estados miembros un conjunto práctico de posibles políticas, que incluyen mandatos, incentivos para la I+D y apoyo a la infraestructura, para fomentar la producción y el uso de SAF, de conformidad con el Marco Mundial para los Combustibles de Aviación Sostenibles de la OACI. La guía se apoya también en herramientas como las *SAF Rules of Thumb* (ICAO, 2025c) para la estimación de costos y producción, y se nutre del trabajo continuo en el Rastreador de Políticas Ambientales de la OACI. El contenido de la Tabla 16 está alineado con dichas recomendaciones de la OACI.

Tabla 16. Descripción de algunas políticas que pueden potenciar el desarrollo de la industria del SAF.

Tipo de política	Descripción	Ventajas	Desventajas
Mandatos	Obligan a las aerolíneas/proveedores a incluir un mínimo de SAF en el combustible de aviación o a un mínimo de reducción de emisiones de GEI	<ul style="list-style-type: none"> • Garantizan demanda estable de SAF • Dan señales claras de largo plazo 	<ul style="list-style-type: none"> • Pueden encarecer boletos • Riesgo de “falta de oferta” si no hay capacidad de producción suficiente
Sistema de Comercio de Emisiones (ETS)	Límite de emisiones con permisos comerciables. Aerolíneas pagan por CO ₂ emitido (ej. EU ETS)	<ul style="list-style-type: none"> • Incentiva la eficiencia • Flexible: las empresas deciden si reducir emisiones o comprar permisos 	<ul style="list-style-type: none"> • Volatilidad de precios • No necesariamente impulsa SAF si hay opciones más baratas de reducción
Incentivos fiscales	Subsidios, créditos o deducciones de impuestos para SAF	<ul style="list-style-type: none"> • Estimulan producción y oferta • Pueden hacer competitivo al SAF frente al Jet-A1 	<ul style="list-style-type: none"> • Costosos para el Estado • Riesgo de subsidios “mal diseñados” que beneficien combustibles poco sostenibles

Tipo de política	Descripción	Ventajas	Desventajas
Penalizaciones (impuestos al carbono)	Gravámenes adicionales al uso de combustibles fósiles en aviación	<ul style="list-style-type: none"> • Internalizan el costo ambiental • Recaudan fondos que pueden reinvertirse en transición 	<ul style="list-style-type: none"> • Políticamente impopulares • Puede aumentar los costos de boletos
Créditos de carbono o compensaciones	Aerolíneas compran créditos de proyectos de reducción/absorción de CO ₂ para “compensar” emisiones	<ul style="list-style-type: none"> • Flexibles y globales • Pueden apoyar proyectos climáticos 	<ul style="list-style-type: none"> • No reducen emisiones directas del sector • Calidad de créditos cuestionable

Además de las políticas descritas en la Tabla 16, las autoridades pueden incentivar a los productores de SAF dando preferencias en licitaciones públicas o en el uso de infraestructura estatal. Dichas preferencias también pueden ser otorgadas a aerolíneas y otras empresas que consuman SAF, así como brindar una reducción de las tarifas aeroportuarias que dependa de la cantidad usada del biocombustible.

La Tabla 17 resume la aplicación de las políticas descritas en la Tabla 16 en algunos países/regiones. En la Unión Europea (UE), en general, se emplean mandatos de mezcla junto con un Sistema de Comercio de Emisiones [ETS, por sus siglas en inglés (Emission Trading System)]. Sin embargo, cada país miembro añade ciertas particularidades como incentivos fiscales o penalizaciones. Muchos otros estados, como Brasil, India, Indonesia o Nueva Zelanda, han optado también por establecer objetivos nacionales cuantificados. En los Estados Unidos se dan incentivos fiscales que constan de exenciones fiscales que dependen de la capacidad de producción, lo que ha disparado los planes para la construcción de nuevas plantas de SAF. La adopción del SAF por parte de las aerolíneas puede conllevar un incremento en los costos de sus operaciones por concepto de combustible, por lo que es necesario que éstas analicen y adopten estrategias de contención. La Figura 42 resume algunas de estas estrategias.

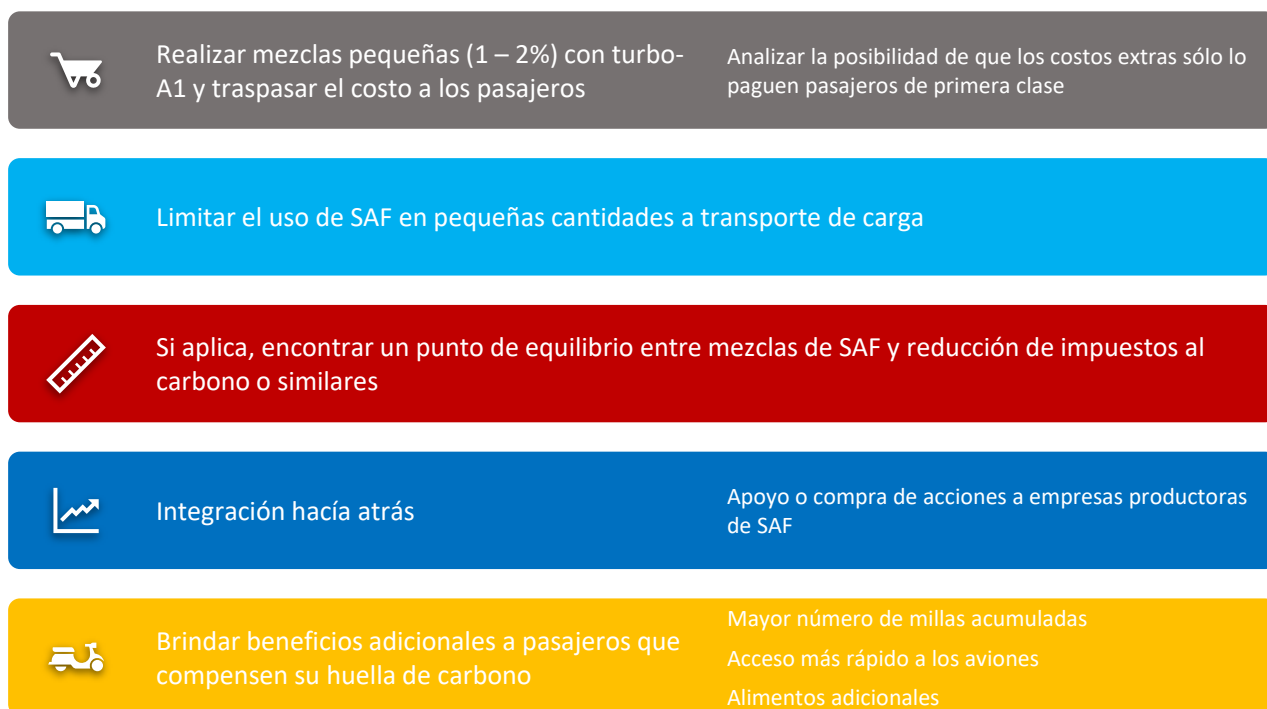


Figura 42. Estrategias sugeridas para las aerolíneas para la inclusión del SAF en sus actividades.

Tabla 17. Resumen de algunas políticas para el desarrollo de la industria de SAF.

País / Región	Descripción	Año de implementación	Tipo de Política					Referencias
			Mandato	Sistema de comercio de emisiones	Incentivos fiscales	Penalización	Créditos de carbono	
Unión Europea (UE)	Obligación progresiva de mezcla de SAF (hasta 70% en 2050), integración de CORSIA y ETS de aviación, seguimiento de emisiones no-CO ₂	2023–2050	x	x				(Proost, 2024; Scheelhaase et al., 2024)
Italia	Propuestas: subsidios para infraestructuras, créditos fiscales para producción, reducción de impuestos a usuarios SAF	Propuestas recientes (sin mandato específico)	x	x	x			(Erriu et al., 2024)
Suecia	Obligación de mezcla de SAF, precio al carbono y multa por incumplimiento; se sugiere aumentar mandato y precio del carbono para acelerar transición	Desde 2021 en adelante	x	x		x		(Trinh et al., 2021)
USA	Crédito fiscal por galón de SAF producido. Implementado vía Inflation Reduction Act. Vigente hasta 2027	2021–2022			x			(Korkut & Fowler, 2021)
Brasil	Programa ProBioQAV y políticas de mercado regulado; incentivos combinados: créditos de carbono, subvenciones de capital, precios premium. Mandato basado en emisiones y no en mezcla	2027	x		x		x	(Advanced BioFuels USA, 2025)
India	India está implementando una Política Nacional sobre Combustible de Aviación Sostenible (SAF) con ambiciosos objetivos de mezcla de SAF, que apuntan al 1% para 2027, al 5% para 2030 y hasta al 15% para 2040, para convertirse en un productor y exportador de SAF.	2027	x		x			(Hindustan Times News, 2025)
Indonesia	Regulación No. 12/2015: mezcla obligatoria 2% (2016), 3% (2020), 5% (2025) con SAF en jet fuel	2016–2025	x					(Prayitno et al., 2023)
Nueva Zelanda	Propuestas: mandato de SAF, integración al ETS, reforma al impuesto de combustibles, políticas de turismo sostenible	2023 en adelante	x	x				(Callister & McLachlan, 2023)

SECCIÓN 4. PLAN DE ACCIÓN

4.1 MARCO REGULATORIO Y POLÍTICAS

La Figura 43 resume las principales políticas que podrían estar involucradas en el desarrollo de la industria del SAF en el Perú a partir de diferentes materias primas. Para la comercialización de SAF se debe tener especial atención a la Ley 28054 y a la Ley 32276 sobre el desarrollo de biocombustibles, así como al Decreto Supremo 021-2007-EM, concerniente a temas de calidad de combustibles, los Decretos Supremos 006-2004-MINAM y 053-2009-EF para temas tributarios y el Decreto Supremo 015-2006-EM, concerniente a aspectos ambientales en actividades de hidrocarburos. Las otras leyes aplicables dependen de la materia prima empleada para la producción de SAF.

El Decreto Supremo 016-2012-AG sobre el manejo de residuos sería aplicable en el caso del aprovechamiento de RSU, aceites vegetales residuales, residuos pecuarios y residuos agrícolas. Se deben aplicar también reglamentos de transporte de residuos que pueden variar si el residuo es peligroso (Ley 28256) o no es peligroso (Decreto supremo 017-2009-MTC). Para el caso de producción de SAF a partir de cultivos bioenergéticos (aceite de palma, caña de azúcar y sorgo), se aplicaría el marco regulatorio agrícola, incluyendo la ley forestal y fauna silvestre (Ley 29763), reglamentos del sector agrario y riego (Decreto supremo 006-2024-MIDAGRI) y reglamentos de infracciones (Decreto supremo 017-2012-AG).

Opciones vanguardistas para el aprovechamiento de gases de chimenea deberían tener en cuenta algunos lineamientos o beneficios que pueden ser aplicables bajo la Ley 30754 sobre el marco del cambio climático, la Ley 30215 sobre mecanismos de retribución por servicios ecosistémicos, o el Decreto supremo 011-2015-MINAM sobre la estrategia nacional ante el cambio climático.

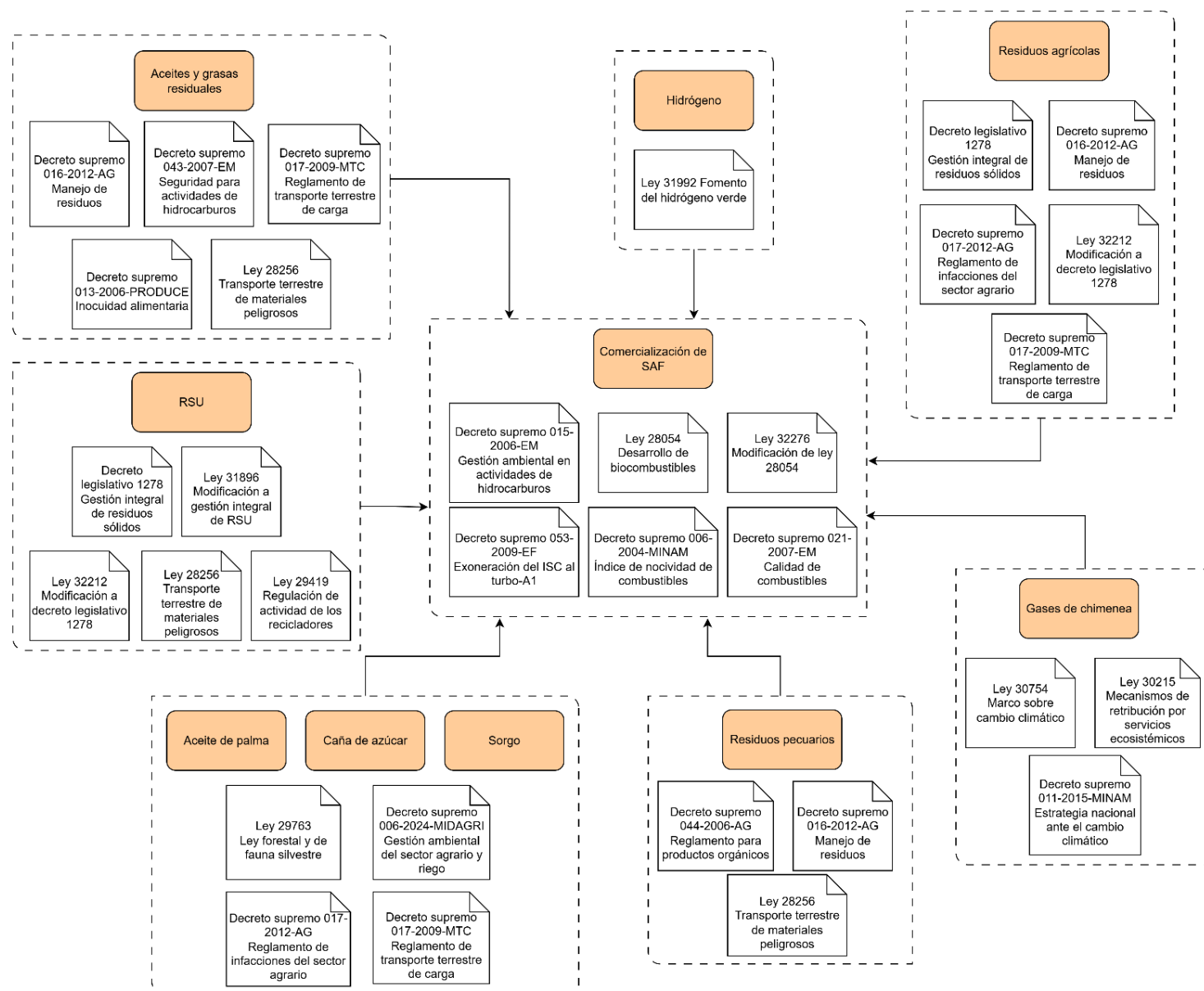


Figura 43. Resumen de las principales políticas que podrían incidir en el desarrollo de SAF a partir de diferentes materias primas en el Perú.

4.2 FACTORES CRÍTICOS DE ÉXITO

La Figura 44 muestra un diagrama de espina de pescado que reúne las principales limitantes identificadas por los actores involucrados en la producción de SAF en el Perú durante el taller de divulgación. El análisis indica que los desafíos y oportunidades se agrupan en torno a varios ejes estratégicos que, en conjunto, definen los factores críticos de éxito para el desarrollo del sector. Estos ejes reflejan no solo la complejidad técnica y logística del proceso, sino también la necesidad de articular políticas públicas, capacidades industriales y mecanismos de financiamiento bajo una misma visión de país.

Uno de los aspectos más relevantes señalados es la gobernanza del sistema y el marco regulatorio asociado. Los participantes coincidieron en que la falta de una política nacional específica para SAF, junto con la ausencia de incentivos claros y de un marco de certificación adaptado al contexto peruano, constituye una de las principales barreras para atraer inversiones y desarrollar proyectos a escala. Superar esta limitante requiere establecer una coordinación efectiva entre los distintos ministerios y entidades regulatorias, así como diseñar instrumentos normativos y financieros que otorguen certidumbre y reduzcan el riesgo percibido por los inversionistas. De este modo, la construcción de un entorno institucional sólido se convierte en un requisito indispensable para el despegue del sector.

Otro conjunto de limitantes identificadas se relaciona con la disponibilidad y gestión de las materias primas. El potencial técnico del país depende en gran medida del aprovechamiento de residuos sólidos urbanos, residuos agrícolas, aceites usados y estiércoles; sin embargo, la dispersión geográfica, la informalidad en la recolección y la falta de infraestructura de acopio dificultan su aprovechamiento a gran escala. En este sentido, los factores críticos de éxito pasan por fortalecer los sistemas locales de segregación y valorización, establecer centros regionales de acopio y logística, y asegurar la trazabilidad de las materias primas. Además, la articulación con programas de gestión de residuos y con políticas de economía circular permitiría consolidar un suministro estable y sostenible para la producción de SAF.

Finalmente, los resultados también resaltan la importancia de los aspectos tecnológicos, económicos y sociales como pilares transversales del éxito. La selección de rutas tecnológicas maduras y compatibles con la infraestructura existente —como el coprocesado en refinerías o las tecnologías HEFA— puede acelerar la implementación inicial y reducir los costos de inversión. No obstante, el acceso a financiamiento preferencial, la existencia de contratos de compra a largo plazo (*offtake agreements*) y la creación de incentivos de mercado resultan igualmente determinantes para garantizar la viabilidad económica. A ello se suma la necesidad de cumplir estándares ambientales y sociales estrictos, que aseguren la aceptación pública y el acceso a mercados internacionales comprometidos con la descarbonización de la aviación. En conjunto, estos elementos delinean una hoja de ruta en la que la colaboración público-privada y la coherencia entre políticas sectoriales se configuran como las verdaderas claves para el desarrollo sostenible de los SAF en el Perú.

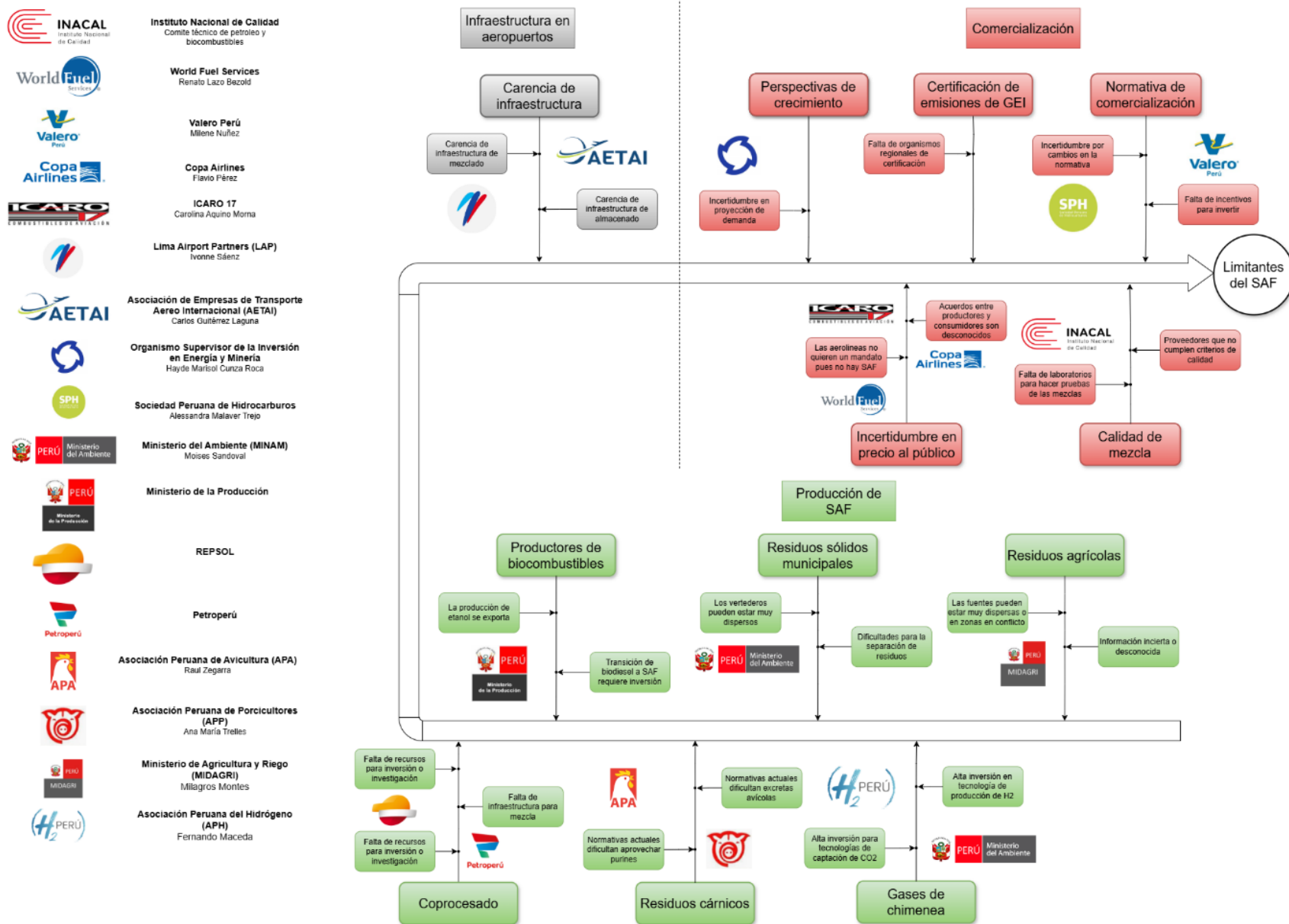


Figura 44. Diagrama de pesca de las principales limitantes identificadas en la producción de SAF en el Perú.

4.3 PRINCIPALES HALLAZGOS

La Tabla 18 resume las oportunidades y retos identificados para la producción de SAF a partir de las diversas materias primas identificadas. Es importante destacar que aquellos con mayor potencial de reducción de emisiones tendrán un mayor valor medioambiental, pero también comercial, ya que su uso bajo el esquema CORSIA ofrecerá un incentivo proporcional a su potencial de reducción de carbono.

En general, se observa que los residuos agrícolas, los residuos sólidos urbanos (RSU) y los residuos pecuarios destacan como opciones con alto potencial de disponibilidad, reducción de emisiones y bajo riesgo de competencia con la seguridad alimentaria. Su uso también ofrecería importantes beneficios sociales y medioambientales adicionales, ligados a la recuperación de residuos que pueden integrarse en esquemas de economía circular y de innovación tecnológica. Enfrentan, sin embargo, desafíos relacionados con la logística de recolección, la fragmentación de la oferta y la necesidad de mejorar la infraestructura de acopio y transporte. Su conversión utiliza una tecnología que, aunque es bien conocida, está aún en fase de demostración a escala industrial (gasificación Fischer-Tropsch o FT), lo que requiere aún cierto tiempo para su potencial implementación efectiva. Los residuos pecuarios se encuentran en etapas tempranas o a pequeña escala; pueden integrarse en esquemas de economía circular y de innovación tecnológica.

Los aceites y grasas residuales destacan también como una opción con mayor potencial en el corto y medio plazos, ya que su uso a través de la tecnología de coprocesado puede ser implementado en refinerías existentes con costes y tiempos de implementación mucho menores que otras tecnologías. Siendo un residuo, ofrece igualmente un alto potencial de reducción de emisiones y bajo riesgo de competencia con la seguridad alimentaria, aunque también enfrenta desafíos relacionados con su baja escala de recolección, que requeriría regulaciones específicas para mejorar significativamente la infraestructura de recolección, acopio y transporte.

Las materias primas con cadenas productivas ya establecidas, como el etanol de caña de azúcar y el biodiésel de aceites vegetales, presentan ventajas en términos de infraestructura existente y experiencia local; sin embargo, sus principales limitaciones se vinculan a la competencia con mercados de alimentos y a los riesgos de cambio de uso de suelo, lo que podría comprometer su sostenibilidad ambiental. En el caso específico del aceite de palma, su alto rendimiento energético lo convierte en una alternativa atractiva, aunque los riesgos ligados a impactos socioambientales asociados a la deforestación y la presión sobre ecosistemas sensibles representan un reto crítico que debe gestionarse mediante políticas estrictas de sostenibilidad.

Por otra parte, las materias primas emergentes, como el sorgo cultivado en tierras marginales, ofrecen oportunidades de diversificación y adaptación al cambio climático, aunque requieren inversiones en investigación, infraestructura agrícola y esquemas de apoyo a productores rurales.

Tabla 18. Resumen de oportunidades y retos identificados para la producción de SAF a partir de diversas materias primas.

Materia prima	Oportunidades	Retos
RSU	<ul style="list-style-type: none"> • Amplia disponibilidad • Alto potencial de mitigación de GEI • Contribuye a valorizar un residuo 	<ul style="list-style-type: none"> • Dificultades en recolección y transporte por alta dispersión • Creación de un modelo de negocio que contemple tanto la recolección como el aprovechamiento del recurso (integración hacia atrás o regresiva)
Residuos agrícolas	<ul style="list-style-type: none"> • Amplia disponibilidad • Alto potencial de mitigación de GEI • Contribuye a valorizar un residuo 	<ul style="list-style-type: none"> • Dificultades en recolección y transporte por alta dispersión • Variabilidad estacional • Necesidad de asegurar la fertilidad del suelo
Transición del etanol de caña de azúcar a SAF	<ul style="list-style-type: none"> • Existencia de una cadena de suministro establecida • Sector azucarero interesado en la expansión hacia biocombustibles 	<ul style="list-style-type: none"> • Competencia de los mercados de etanol • Riesgos de cambio de uso de suelo • Requerimiento de infraestructura para la transición a SAF
Transición del biodiésel de aceites vegetales a SAF	<ul style="list-style-type: none"> • Existencia de una cadena de suministro establecida • Facilidad de transición mediante la ruta del coprocesado • Tecnologías de conversión disponibles a nivel comercial 	<ul style="list-style-type: none"> • Dependencia de precios internacionales en aceites
Aceite de palma	<ul style="list-style-type: none"> • Alto rendimiento energético • Alto potencial de generación de empleo rural • Tecnologías de conversión disponibles a nivel comercial 	<ul style="list-style-type: none"> • Riesgos de impactos en torno al uso de la tierra • Dependencia de precios internacionales en aceites
Aceites y grasas residuales	<ul style="list-style-type: none"> • Existencia de una cadena de suministro establecida • Facilidad de transición mediante la ruta del coprocesado • Sector palmero interesado en la expansión hacia biocombustibles • Contribuye a valorizar un residuo 	<ul style="list-style-type: none"> • Baja escala de recolección • Materia prima muy dispersa
Sorgo	<ul style="list-style-type: none"> • No compite con el sector de alimentos • Valoración de suelos áridos y marginales • Adaptable a escenarios de cambio climático 	<ul style="list-style-type: none"> • Poca experiencia local • Incertidumbre en condiciones de cultivo
Residuos pecuarios	<ul style="list-style-type: none"> • Alto potencial de mitigación de GEI • Contribuye a valorizar un residuo • Materia prima homogénea, centralizada y no estacional 	<ul style="list-style-type: none"> • Incertidumbre en rendimiento de SAF (se recomienda realizar estudios de laboratorio) • Creación de un modelo de negocio que contemple tanto la recolección como el aprovechamiento del recurso (integración hacia atrás o regresiva) • Baja densidad de materia prima puede acarrear altos costos de recolección y transporte

Materia prima	Oportunidades	Retos
Gases de chimenea	<ul style="list-style-type: none"> • Contribuye a valorizar un residuo • Alineación con objetivos de descarbonización a largo plazo 	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnología aún en fase piloto. • Altos costos operativos • Altos requerimientos de electricidad

Los gases de chimenea representan una alternativa complementaria que, si bien se encuentra en etapas tempranas o a pequeña escala, puede también integrarse en esquemas de economía circular y de innovación tecnológica. Particularmente, la captura y conversión de CO₂ mediante rutas PTL podría jugar un papel estratégico en el largo plazo, siempre que se logre reducir costos y asegurar el suministro de electricidad renovable a gran escala.

La Tabla 19 describe las acciones recomendadas a seguir para el desarrollo de la industria de SAF. Las medidas incluyen desde la conformación de una mesa panel nacional y la promoción de actividades de divulgación, hasta el establecimiento de un marco regulatorio e incentivos específicos. Estas acciones reflejan la necesidad de coordinación interinstitucional y de alianzas entre el sector público, la academia y la industria, con el fin de garantizar la disponibilidad de materias primas, atraer inversión y facilitar la inserción de tecnologías emergentes.

La experiencia internacional demuestra que la certidumbre regulatoria y los incentivos iniciales son factores determinantes para movilizar proyectos de SAF. En la Unión Europea, los mandatos de mezcla y el esquema ETS han sido motores clave para estimular la demanda, mientras que en Estados Unidos los créditos fiscales han reducido brechas de costos frente al combustible fósil. En contraste, los países sin un marco habilitante suelen enfrentar barreras como el alto riesgo percibido, la ausencia de mecanismos de financiamiento y la falta de infraestructura adecuada.

4.4 PLAN DE ACCIÓN

La Tabla 19 incluye una propuesta de objetivos y acciones recomendadas para ser considerada por el Perú de cara a la elaboración de un Plan de Acción para establecer cadenas de suministro de SAF viables en el país. El objetivo de esta propuesta es que sea discutida por los diferentes agentes nacionales, y en su caso complementada para su aprobación e implementación por el Estado y los agentes nacionales.

Dentro de los objetivos inmediatos se encuentra la generación de una mesa panel que involucre tanto al productor académico, productores y comercializadores de combustible, aerolíneas y miembros del gobierno. Dicha mesa panel debe comprometerse a crear lazos de colaboración empresarial y facilidades para el flujo de información. Dentro de la mesa panel se debe propender por la conceptualización de modelos de negocios con sus propios mecanismos y políticas de apoyo (Tabla 15 y Tabla 16), es decir, generar el plan de implementación de negocios. Para ello, se sugiere que, dentro de la mesa panel, se generen subgrupos de trabajo por cada ruta de producción potencial de SAF (uno por materia prima). Los planes de implementación de negocios serían fundamentales para la subsecuente generación de un marco legal para el desarrollo del SAF. El anexo A8 muestra algunos ejemplos de modelo de negocios para la implementación de la producción de SAF. Se espera que, con estas medidas, se pueda implementar un marco logístico para el biocombustible, es decir, el desarrollo de planes de investigación y desarrollo, trazabilidad, registro de producción y uso y medición de emisiones de GEI. Con ello, se pueden dar una implementación temprana de SAF correspondiente al aprovechamiento de aceites residuales. Las implementaciones medias y tardías de SAF involucrarían aceites vegetales o el uso de residuos.

Tabla 19. Descripción de acciones recomendadas para identificar y establecer cadenas de suministro de SAF viables en el Perú.

Acción recomendada	Cronología	Responsables potenciales										Observaciones
		Sector académico	Productores	Comercializadores	Aerolíneas	Aeropuerto	MIDAGRI	MINAM	Min. Economía	Min. Producción	Min. Transportes y Comunicación	
Objetivo 1: Creación de una mesa panel nacional												
Invitación a partes interesadas	2025 - 2026										x	Partes interesadas ya están enteradas
Objetivo 2: Fortalecimiento de colaboración												
Establecer mecanismos de colaboración y flujo de información	2025 - 2026	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Llevar a cabo debates sobre hidrocarburos y hojas de ruta
Explorar la posibilidad de colaborar con entidades y/o organismos internacionales	2025 - 2026	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Esta posibilidad permitiría replicar iniciativas exitosas y evitar errores
Actividades de divulgación de SAF	2025 - 2026	x	x	x	x	x					x	Divulgación en universidades, ferias de emprendimiento y en partes interesadas
Objetivo 3: Estudiar la viabilidad de implementación de casos de estudio empresarial												
Promover la realización de estudios de implementación empresarial	2026	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	El anexo A8 muestra algunos ejemplos. Los <i>estudios de implementación empresarial</i> pueden ser asistidos bajo el programa ACT-SAF de la OACI
Objetivo 4: Creación de un marco legal												
Identificación de barreras y oportunidades	2026	x	x	x	x			x	x	x	x	Revisar ambigüedades actuales y ambiciones de las partes interesadas
Sensibilización de opinión pública	2026	x	x	x	x							Divulgación entre pasajeros y emprendedores potenciales
Establecimiento de incentivos gubernamentales para la producción de SAF	2026	x	x	x				x	x	x		Incentivos dirigidos a empresas productoras potenciales
Establecimiento de incentivos gubernamentales para el uso de SAF	2026	x			x			x	x	x		Incentivos dirigidos a aerolíneas

Acción recomendada	Cronología	Responsables potenciales										Observaciones
		Sector académico	Productores	Comercializadores	Aerolíneas	Aeropuerto	MIDAGRI	MINAM	Min. Economía	Min. Producción	Min. Transportes y Comunicación	
Estudio de beneficios económicos por la implementación de SAF para efectos tributarios o generación de empleo	2026	x							x	x		Estimar el número de empleos generados, así como el efecto de la implementación de incentivos
Escritura de documento normativo	2026	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	—
Objetivo 5: Implementación de marco logístico												
Promover la investigación y desarrollo de la industria de SAF	2026	x	x	x	x			x		x		Proyectos de investigación en torno a nuevas tecnologías, análisis económicos detallados y estimación de emisiones de GEI
Establecimiento de estrategias para incentivar el uso de SAF	2026				x	x						Estrategias fuera del espectro de incentivos o apoyos gubernamentales
Establecimiento de un sistema de monitoreo de emisiones de GEI del sector de aviación	2026	x			x	x		x			x	Enfocado a productores y comercializadores de combustibles
Establecimiento de un sistema de monitoreo de producción y uso de SAF	2026	x	x	x	x	x				x	x	Enfocado a productores y comercializadores de combustibles
Objetivo 6: Implementación inicial de SAF												
Producción piloto de SAF a partir de aceites vegetales mediante coprocesado	2027	x	x	x			x					Coordinación entre productores de biodiésel, recolectores de aceite residual y refinerías. El MINAM tiene información respecto a la generación de aceites vegetales residuales
Producción de SAF a partir de aceites vegetales mediante la ruta HEFA	2027	x	x	x			x	x				Coordinación entre empresas productoras de biodiésel para una transición a producción de SAF. El MIDAGRI cuenta con información sobre producción de aceites en campo

Acción recomendada	Cronología	Responsables potenciales										Observaciones
		Sector académico	Productores	Comercializadores	Aerolíneas	Aeropuerto	MIDAGRI	MINAM	Min. Economía	Min. Producción	Min. Transportes y Comunicación	
Implementación de cultivos de sorgo	2027	x	x				x					Analizar condiciones de cultivo y rendimientos
Objetivo 7: Implementación media de SAF												
Producción comercial de SAF a partir de aceites vegetales	2028		x	x	x							Incremento en la capacidad de producción de SAF mediante la ruta HEFA y/o coprocesado
Producción piloto de SAF a partir de etanol de caña de azúcar o sorgo mediante la ruta ATJ	2028	x	x	x								Coordinación con productores o comercializadores de etanol para su transición a SAF
Producción piloto de SAF a partir de RSU y/o de residuos agrícolas	2030	x	x				x	x				Estudio en campo de la producción de SAF a partir de RSU mediante una integración hacia atrás, es decir, un modelo de negocio que contemple tanto la recolección como la transformación del RSU
Producción piloto de SAF a partir de residuos pecuarios	2030	x	x									Estudio en campo de la producción de SAF a partir de residuos pecuarios mediante una integración hacia atrás, es decir, un modelo de negocio que contemple tanto la recolección como la transformación del residuo
Objetivo 8: Implementación tardía de SAF												
Producción comercial de SAF a partir de etanol de caña de azúcar o sorgo mediante la ruta ATJ	2030		x	x	x							Incremento en la capacidad de producción de SAF mediante la ruta ATJ
Producción piloto de SAF a partir de gases de chimenea	2033	x	x									Coordinación con empresas generadoras de gases de chimenea para el acoplamiento de sistemas de captura de carbono

REFERENCIAS

- Adaptation Fund. (2024). *Adaptation Fund*. Adaptation Fund. <https://www.adaptation-fund.org/>
- Advanced BioFuels USA. (2025). *Brazil SAF mandate to target emissions reductions starting in 2027*. Brazil SAF Mandate to Target Emissions Reductions Starting in 2027. <https://advancedbiofuelsusa.info/brazil-saf-mandate-to-target-emissions-reductions-starting-in-2027>
- Agrodataperu. (2025a, April 28). *Alcohol Etílico Perú Exportación 2025*. Exporaciones. <https://agrodataperu.com/2025/04/alcohol-etilico-peru-exportacion-2025-marzo.html>
- Agrodataperu. (2025b, June). *Soya aceite en bruto*. Perú Importación. <https://agrodataperu.com/2025/07/soya-aceite-en-bruto-peru-importacion-2025-junio.html>
- Aleme, M., Tulu, D., & Dejene, M. (2024). Biomass production, growth performance and character relationship of six varieties of Napier (*Pennisetum purpureum* L schumach.) grass at Teppi south west Ethiopia. *Heliyon*, 10(23), e40528. <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2024.E40528>
- Apoyo & Asociados. (2025, May). *Petróleos del Perú - PETROPERÚ S.A. Compañías. Hidrocarburos*. https://www.aai.com.pe/wp-content/uploads/.2024/05/Petroperu-Dic-23.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Appiah-Nkansah, N. B., Li, J., Rooney, W., & Wang, D. (2019). A review of sweet sorghum as a viable renewable bioenergy crop and its techno-economic analysis. *Renewable Energy*, 143, 1121–1132. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.05.066>
- ASTM. (2025). *ASTM International | ASTM*. ASTM. <https://www.astm.org/>
- Bassam, E. (1997). *Sweet sorghum, a sustainable crop for energy prooduction in Europe. Results of 10 years experiments 1985 - 1995*. Sweet Sorghum, a Sustainable Crop for Energy Prooduction in Europe. https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/zi000349.pdf
- BCEOData. (2025). *Balanza comercial*. Series Anuales. <https://estadisticas.bcrp.gob.pe/estadisticas/.series/.anuales/.resultados/.PM40027BA-PM40031BA-PM40036BA/html/2010/2024/>
- BDALC. (2011, April 4). *Financiamiento para el desarrollo de complejo agroindustrial en Perú recibe premio de Euromoney*. Noticias. <https://www.caf.com/es/.actualidad/noticias/.financiamiento-para-el-desarrollo-de-complejo-agroindustrial-en-peru-recibe-premio-de-euromoney/>
- Binda García, J. R., Guerra Quispe, R., Ocaña Angeles, J., Torres Leon, G., & Trigos Medina, J. (2012). *Análisis estratégico de la industria del biodiesel en el Perú*. Pontificia Universidad Católica del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/1627>
- Boehm, R. C., Yang, Z., Bell, D. C., Feldhausen, J., & Heyne, J. S. (2022). Lower heating value of jet fuel from hydrocarbon class concentration data and thermo-chemical reference data: An uncertainty quantification. *Fuel*, 311, 122542. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2021.122542>
- Bora, A., Thondi Rajan, A. S., Ponnuchamy, K., Muthusamy, G., & Alagarsamy, A. (2024). Microalgae to bioenergy production: Recent advances, influencing parameters, utilization of wastewater – A critical

review. *Science of The Total Environment*, 946, 174230. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2024.174230>

Brittaine, R., & Lutaladio, N. (2010). Jatropha: A Smallholder Bioenergy Crop The Potential for Pro-Poor Development. In *Integrated Crop Management* (Vol. 8). <https://www.fao.org/4/i1219e/i1219e.pdf>

CAAFI. (2025). *Commercial aviation alternative fuels initiative*. Tools. <https://www.caa.fi.org/tools>

Cacciuttolo, C., Cano, D., Guardia, X., & Villicaña, E. (2024). Renewable Energy from Wind Farm Power Plants in Peru: Recent Advances, Challenges, and Future Perspectives. *Sustainability* 2024, Vol. 16, Page 1589, 16(4), 1589. <https://doi.org/10.3390/SU16041589>

CAF. (2025). *Inversionistas*. Inversionistas. <https://www.caf.com/es/.inversionistas/>.

Callister, P., & McLachlan, R. (2023). Decarbonising Aotearoa New Zealand's Aviation Sector: hard to abate, but even harder to govern. *Policy Quarterly*, 19(2), 9–18. <https://doi.org/10.26686/PQ.V19I2.8232>

Campuzano-Duque, L. F., & Cardeño-López, F. (2020). Composición de los ácidos grasos de genotipos de *Jatropha curcas* L., en Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 31(1), 95–104. <https://doi.org/10.15517/AM.V31I1.37574>

Carlos Estrella Viceministro de Electricidad José Neil Meza Segura, V., & Ing Luis Vílchez León Ing Giannina Ibarra Vásquez Ing José Luis Caro Jara Ing Lucero Luciano de la Cruz, C. (2023). *Balance nacional de energía 2022*. www.minem.gob.pe

CDN. (2024). *Exposición de motivos decreto supremo que aprueba los índices de nocividad de combustibles (INC) para el año 2024*. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/5797940/5144415-exposicion-de-motivos-proyecto-decreto-supremo-aprueba-inc-2024.pdf?v=1706885871>

CPI Research. (2024). *Perú: Población 2024*. <https://www.cpi.pe/images/.upload/paginaweb/archivo/23/PER%C3%9A%20POBLACI%C3%93N%2024.pdf>

Cuevas-Castillo, G. A., Michailos, S., Akram, M., Hughes, K., Ingham, D., & Pourkashanian, M. (2024). Techno economic and life cycle assessment of olefin production through CO₂ hydrogenation within the power-to-X concept. *Journal of Cleaner Production*, 469, 143143. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2024.143143>

Datosmacro. (2025). *Perú - Piramide de población*. Piramide de Población. https://datosmacro.expansion.com/demografia/estructura-poblacion/peru?utm_source=chatgpt.com

de Oliveira Maia, B. G., de Oliveira, A. P. N., de Oliveira, T. M. N., Marangoni, C., Souza, O., & Sellin, N. (2018). Characterization and production of banana crop and rice processing waste briquettes. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 37(4), 1266–1273. <https://doi.org/10.1002/EP.12798>

Diana, S., & Noa, L. B. (2021). Deforestación en la región anazónica del Perú: Situación y perspectivas. *Revista Electrónica de Medio Ambiente*, 21(2), 20–39. https://www.ucm.es/.iuca/file/articulo_2_m-a_2021-1?ver

Dunnell, T. (2018, May 30). *The main airports in Peru, with map*. The Main Airports in Peru, with Map . https://newperuvian.com/main-airports-in-peru-map/?utm_source=chatgpt.com

EDGAR. (2023). *The emissions database for global atmospheric research*. Emissions by Country. https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2023

- Elliott, B., Bauer, C., & Gibbins, J. (2024). Cost reductions in post-combustion CO2 capture – possibilities and pipedreams Or: What carbon capture really costs Sources: Optimists, liars and damn liars. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/SSRN.5071028>
- Entendiendo el Apéndice III de la Ley del IGV. (n.d.). Retrieved June 30, 2025, from <https://calculadoraigv.com.pe/apendice-iii/>
- Erriu, R., Marcucci, E., & Gatta, V. (2024). Facilitating a Sustainable Aviation Fuel Transition in Italy. *Energies* 2024, Vol. 17, Page 3388, 17(14), 3388. <https://doi.org/10.3390/EN17143388>
- Escuela de mapas. (2025). *Mapas del Perú: Mapa Político, Geográfico y más cartografía*. - escuela de mapas. América. <https://escuelademapas.com/mapas-del-peru-mapa-politico-geografico-y-mas-cartografia/>
- Eswaran, S., Subramaniam, S., Geleynse, S., Brandt, K., Wolcott, M., & Zhang, X. (2021). Dataset for techno-economic analysis of catalytic hydrothermolysis pathway for jet fuel production. *Data in Brief*, 39, 107514. <https://doi.org/10.1016/J.DIB.2021.107514>
- García Romeral, J., Pavía Gómez, M., García Sanz, T., Chirivella Martorell, J., & Serrano Aroca, Á. (2017). Principios de Biotecnología y Bioingeniería en el cultivo de microalgas: importancia, problemas tecnológicos, tipos y sistemas de cultivos, crecimiento, factores limitantes, selección, aislamiento, escalado y caracterización bioquímica. *Nereis: Revista Iberoamericana Interdisciplinar de Métodos, Modelización y Simulación*, ISSN 1888-8550, N°. 9, 2017, Págs. 115-130, 9, 115–130. <https://dialnet.unirioja.es/.servlet/articulo?codigo=6041049&info=resumen&idioma=ENG>
- Geografía Infinita. (2025). *El clima del Perú a través de los mapas*. Perú. <https://www.geografiainfinita.com/2021/02/el-clima-del-peru-a-traves-de-los-mapas/>.
- Global solar atlas. (2025). *Global Solar Atlas*. Peru. <https://globalsolaratlas.info/download/peru>
- GlobalData. (2023, August). *UCO supply outlook*. UCO Supply Outlook. https://cleanfuels.org/wp-content/uploads/.GlobalData_UCO-Supply-Outlook_Sep2023.pdf
- Green Climate Fund. (2025). *About*. Green Climate Fund. <https://www.greenclimate.fund/>
- Hindustan Times News. (2025, September 3). *DGCA prepares study report on roadmap for sustainable aviation fuel rollout*. <https://www.hindustantimes.com/india-news/.dgca-prepares-study-report-on-roadmap-for-sustainable-aviation-fuel-rollout-101756876803081.html>
- Hosnar, D., & Navarro, L. (2018). *Potencial energético de los residuos de la cadena de valor del cacao (Theobroma Cacao) en la Región Madre de Dios*. Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/3660>
- IATA. (2025). *Unveiling the biggest airline costs*. IATA Knowledge Hub. <https://www.iata.org/en/publications/.newsletters/.iata-knowledge-hub/unveiling-the-biggest-airline-costs/>.
- ICAO. (2021). *CORSIA default life cycle emissions values for CORSIA eligible fuels*. ICAO Document. [https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/.ICAO document 06 - Default Life Cycle Emissions - March 2021.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/.ICAO%20document%2006%20-%20Default%20Life%20Cycle%20Emissions%20-%20March%202021.pdf)
- ICAO. (2022a). *CORSIA methodology for calculating actual life cycle emissions values*. https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/.CORSIA_Eligible_Fuels/.ICAO%20document%2007%20-%20Methodology%20for%20Actual%20Life%20Cycle%20Emissions%20-%20June%202022.pdf

- ICAO. (2022b). *SAF rules of thumb*. SAF Rules of Thumb. https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/.SAF_RULESOFTHUMB.aspx
- ICAO. (2025a). *CORSIA eligible fuels*. CORSIA Eligible Fuels. <https://www.icao.int/corsia-eligible-fuels>
- ICAO. (2025b). *SAF Guidance Potential Policies*. <https://www.icao.int/SAF/saf-guidance-potential-policies>
- ICAO. (2025c). *SAF Rules of Thumb*. Environmental Protection. <https://www.icao.int/environmental-protection/saf-rule-of-thumb>
- IEA. (2025). *Peru*. Countries & Regions. <https://www.iea.org/countries/.peru/energy-mix>
- IEA Bioenergy. (2017). *State of Technology Review – Algae Bioenergy*. State of Technology Review – Algae Bioenergy. <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/.2017/02/IEA-Bioenergy-Algae-report-update-Final-template-20170131.pdf>
- ITC. (2025). *Lista de los productos exportados por Perú*. Lista de Los Productos Exportados Por Perú. https://www.trademap.org/Product_SelCountry_TS.aspx?nvpm=3%7c604%7c%7c%7cTOTAL%7c%7c%7c2%7c1%7c1%7c2%7c2%7c1%7c1%7c1%7c1%7c1
- Klenert, D., García-Gutiérrez, P., Tonini, D., Saveyn, H., & Marschinski, R. (2025). The economics of waste oil recycling in the EU. *Journal of Environmental Economics and Policy*, 14(1), 1–22. <https://doi.org/10.1080/21606544.2024.2318385>
- Korkut, E., & Fowler, L. B. (2021). Regulatory and Policy Analysis of Production, Development and Use of Sustainable Aviation Fuels in the United States. *Frontiers in Energy Research*, 9, 750514. <https://doi.org/10.3389/FENRG.2021.750514/BIBTEX>
- MapTrove. (2025). *Peru airports map*. Countries of the World. https://www.maptrove.com/peru-airports-map.html?utm_source=chatgpt.com
- MIDAGRI. (2024). *Superficie agrícola del Perú*. Superficie Agrícola Del Perú. <https://siea.midagri.gob.pe/portal/informativos/.superficie-agricola-peruana>
- MIDAGRI. (2025). *Boletines anuales*. Anuarios. <https://siea.midagri.gob.pe/portal/publicacion/boletines-anuales/.4-agricola>
- MINAM. (2011, June). *La desertificación en el Perú*. La Desertificación En El Perú. https://www.euroclima.org/images/.Publicaciones/.Suelos/.Peru_4Inf_Desertificacion1.pdf
- MINAM. (2015). *Perú, país de bosques*. Conservación de Bosques Para La Mitigación Del Cambio Climático. <https://www.minam.gob.pe/programa-bosques/.peru-pais-de-bosques/>.
- MINAM. (2017). *Ley de promoción del mercado de biocombustibles*. Ley No. 28054. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/.2017/04/Ley-N%cb0-28054.pdf>
- MINAM. (2021a). *Análisis de riesgo al cambio climático*. Análisis de Riesgo al Cambio Climático. https://www.undp.org/sites/.g/files/.zskgke326/files/.migration/pe/PE_PNUD_Analisis-del-riesgo-al-cambio-climatico.pdf
- MINAM. (2021b). *Cobertura y pérdida de bosque húmedo amazónico 2021*. Cobertura y Pérdida de Bosque Húmedo Amazónico. https://geobosques.minam.gob.pe/geobosque/descargas_geobosque/perdida/documentos/.Reporte_Cobertura_y_Perdida_de_Bosque_Humedo_Amazonico_2021.pdf

- MINAM. (2021c). *Finanzas Verdes. Campañas y Eventos*.
<https://www.gob.pe/institucion/minam/campa%C3%B1as/.7006-finanzas-verdes>
- MINAM. (2023). *Documento de resultados del inventario nacional de gases de efecto invernadero 2000 - 2019*.
- MINAM. (2024, July). *Microsoft Power BI*.
<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoIY2I4Y2YwNmEtM2U0Zi00NTM2LTllZWVhbnRlZWEtNjFINDc5MWVkbMDQwliwidCI6IjBIMmFiZjRILWExZjUtNDZiZi1iOWE0LWM5YWE2ZGQ1NTE4MCJ9&pageName=55c508f90ed25db0b4cb>
- MINAM. (2025a). *Mapa climático del Perú*. Clima. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=mapa-climatico-del-peru>
- MINAM. (2025b, August 19). *Emprendedores por Naturaleza 2025*. Campañas y Eventos.
<https://www.gob.pe/institucion/sernanp/campa%C3%B1as/.56972-emprendedores-por-naturaleza-2025>
- MINEM. (2025, January 24). *Anuario estadístico de electricidad 2023*. Informes y Publicaciones.
https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/.6411602-anuario-estadistico-de-electricidad-2023?utm_source=chatgpt.com
- Mohammed, I. Y., Abakr, Y. A., & Mokaya, R. (2019). Biofuel and valuable products recovery from Napier grass pre-processing: Process design and economic analysis. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(2), 102962. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2019.102962>
- Nacional De Trujillo, U., Ricce, C., Leyva, M., Medina, I., Miranda, J., Saldarriaga, L., Rodriguez, J., & Siche, R. (2013). Uso de residuos agroindustriales de La Libertad en la elaboración de un pan integral. *Agroindustrial Science*, 3(1), 41–46. <https://doi.org/10.17268/agroind.science.2013.01.05>
- Navarro-Pineda, F. S., Baz-Rodríguez, S. A., Handler, R., & Sacramento-Rivero, J. C. (2016). Advances on the processing of Jatropha curcas towards a whole-crop biorefinery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.009>
- Osinergrmin. (2025). *Documentos SCOP*.
<https://www.osinergrmin.gob.pe/empresas/.hidrocarburos/.scop/documentos-scop>
- Petroperú. (2025). *Plantas y terminales*. Unidades Operativas. <https://www.petroperu.com.pe/proyectos-y-unidades-operativas/.unidades-operativas/.plantas-y-terminales/>.
- Pipitone, G., Zoppi, G., Pirone, R., & Bensaid, S. (2023). Sustainable aviation fuel production using in-situ hydrogen supply via aqueous phase reforming: A techno-economic and life-cycle greenhouse gas emissions assessment. *Journal of Cleaner Production*, 418, 138141. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.138141>
- Plataforma del Estado peruano. (2025, March 6). *MINEM: Generación eléctrica eólica y solar aumentó en 66% y 32%, respectivamente, durante el 2024*. Noticias.
https://www.gob.pe/institucion/minem/noticias/.1121351-minem-generacion-electrica-eolica-y-solar-aumento-en-66-y-32-respectivamente-durante-el-2024?utm_source=chatgpt.com
- PopulationPyramid. (2025). *Population of Peru 2024*. Peru. <https://www.populationpyramid.net/peru/2024/>
- Prayitno, P., Novani, S., & Fikri, D. R. A. (2023). Analytical Hierarchy Process (AHP) Model Feedstock Selection on Producing the Sustainable Aviation Fuel. *Indonesian Journal of Multidisciplinary Science*, 2(9), 3202–3211. <https://doi.org/10.55324/IJOMS.V2I9.557>

- Proost, S. (2024). Looking for winning policies to address the climate issue in EU-aviation. *Journal of Air Transport Management*, 115, 102534. <https://doi.org/10.1016/J.JAIRTRAMAN.2023.102534>
- Rau, P. (2019). Aportes en ingeniería hidrológica de zonas áridas. Casos aplicados a la vertiente del Pacífico peruano. *Universidad de Ingeniería y Tecnología UTEC*, 1–16. https://www.academia.edu/40951388/Aportes_en_ingenier%C3%ADa_hidrol%C3%B3gica_de_zonas_%C3%A1ridas_Casos_aplicados_a_la_vertiente_del_Pac%C3%ADfico_peruano
- Repsol. (2025). *Memoria Anual 2024. Refinería La Pampilla*. <https://www.repsol.pe/content/dam/repsol-paises/.pe/joaa-2025/1%20Memoria%20Anual%20Repsol%202024.pdf>
- Reyes Chávez, J. M., & Barrenechea Ramírez, S. (2022). Estimación del potencial energético técnico a partir de biomasa residual agroindustrial y pecuario en el Perú. *Revista de Innovación y Transferencia Productiva (RITP)*, 3(1), 1–15. https://www.researchgate.net/publication/362912303_Estimacion_del_potencial_energetico_tecnico_a_partir_de_biomasa_residual_agroindustrial_y_pecuario_en_el_Peru/fulltext/636ca3db37878b3e8799d10e/Estimacion-del-potencial-energetico-tecnico-a-partir-de-biomasa-residual-agroindustrial-y-pecuario-en-el-Peru.pdf
- Scheelhaase, J., Grimme, W., & Maertens, S. (2024). EU trilogue results for the aviation sector – key issues and expected impacts. *Transportation Research Procedia*, 78, 206–214. <https://doi.org/10.1016/J.TRPRO.2024.02.027>
- Schmerler, D., Velarde, J. C., Rodríguez, A., & Abel y Solís, B. (2019). Energías renovables. Experiencia y perspectivas en la ruta del Perú hacia la transición energética. In *Energías renovables. Experiencia y perspectivas en la ruta del Perú hacia la transición energética*. https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/.Libros/.Osinergmin-Energias-Renovables-Experiencia-Perspectivas.pdf
- Tabernier, L., Fernández, E. C., Tautz, A., Deransy, R., & Martin, P. (2021). Fuel Tankering: Economic Benefits and Environmental Impact for Flights Up to 1500 NM (Full Tankering) and 2500 NM (Partial Tankering). *Aerospace 2021*, Vol. 8, Page 37, 8(2), 37. <https://doi.org/10.3390/AEROSPACE8020037>
- Teoh, R., Schumann, U., Voigt, C., Schripp, T., Shapiro, M., Engberg, Z., Molloy, J., Koudis, G., & Stettler, M. E. J. (2022). Targeted Use of Sustainable Aviation Fuel to Maximize Climate Benefits. *Environmental Science and Technology*, 56(23), 17246–17255. https://doi.org/10.1021/ACS.EST.2C05781/ASSET/IMAGES/.LARGE/ES2C05781_0005.JPEG
- Torroba, A., & Chiara, A. (2024). *Estado de los biocombustibles líquidos en las Américas 2024*. <https://hdl.handle.net/11324/23015>
- Trinh, J., Harahap, F., Fagerström, A., & Hansson, J. (2021). What are the policy impacts on renewable jet fuel in Sweden? *Energies*, 14(21), 7194. <https://doi.org/10.3390/EN14217194/S1>
- UPME. (2011). *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia*. Atlas Del Potencial Energético de La Biomasa Residual En Colombia; Bucaramanga (Colombia) : Universidad Industrial de Santander, 2011. <http://bdigital.upme.gov.co/handle/001/1058>
- Wardejn, M. (2025). *Fuel Fact Sheet*. <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/.fact-sheet-fuel/#:~:text=SAF%20produced%20at%20a%20hefty,of%20USD%201,846%20per%20tonne>
- WBG. (2025). *Clean technology fund*. Financial Intermediary Funds. <https://fiftrustee.worldbank.org/en/about/unit/dfi/fiftrustee/fund-detail/ctf>

ANEXOS

A1. PARTICIPANTES Y COLABORADORES

Institución	Sector
Aeropuertos Andinos del Perú S.A.	Aeronáutica
Aeropuertos del Perú S.A.	Aeronáutica
AETAI	Aeronáutica
Asociación de Gremios Productores Agrarios del Perú	Materias primas
Agencia de Sostenibilidad Energética de Chile	Energías renovables
Airbus	Aeronáutica
ALTA	Aeronáutica
Asociación Civil Perú Renovable	Energías renovables
Asociación de Pequeños Productores Agropecuarios – APAGRO Perú Piura	Materias primas
Asociación Nacional de Productores Ecológicos del Perú - ANPE	Materias primas
Asociación Peruana de Agroindustriales del Azúcar y Derivados - PERUCAÑA	Materias primas
Asociación Peruana de Avicultura	Materias primas
Asociación Peruana de Energía Solar y del Ambiente - APES	Energías renovables
Asociación Peruana de Energías Renovables - SPR	Energías renovables
Asociación Peruana de Productores de Arroz - APEAR	Materias primas
Asociación Peruana Para la Conservación de la Naturaleza - APECO	ONG
ASOPORCI	Materias primas
Banco Interamericano de Desarrollo (BID)	Entidades financieras
Bio Energy Peru S.A.C.	Energías renovables
Conservación Internacional Perú	ONG
Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC)	Entidad gubernamental
H2 Peru	Energías renovables
Herco Combustibles S.A.	Hidrocarburos
IATA	Aeronáutica
Icaro 17	Hidrocarburos
IICA	Organismo internacional

Institución	Sector
INTERTEK PERÚ	Calidad
JETSMART	Aeronáutica
Junta de Aeronáutica Civil de Chile	Entidad gubernamental
Junta Nacional de Palma Aceitera del Perú - JUNPALMA	Materias primas
Latam Airlines Perú	Aeronáutica
MIDAGRI	Entidad gubernamental
MINAM	Entidad gubernamental
OACI	Organismo internacional
OEFA	Entidad gubernamental
OSINERGMIN	Hidrocarburos
PETROPERÚ	Hidrocarburos
PRODUCE	Entidad gubernamental
REPSOL	Hidrocarburos
Ruano Energía	Energías renovables
Seimtec	Consultoría
SKY AIRLINE	Aeronáutica
Sociedad Peruana de Hidrocarburos (SPH)	Hidrocarburos
Star Perú	Aeronáutica
UNI	Academia
Uniagraria	Academia
UPN	Academia
UTEC	Academia
VALERO PERU	Hidrocarburos
World Fuel Services Perú	Hidrocarburos
WWF Perú	ONG

A2. CRITERIOS DESEABLES DE LAS MATERIAS PRIMAS POTENCIALES PARA LA PRODUCCIÓN DE SAF

La materia primas potencial idea para la producción de SAF debería cumplir con ciertos requisitos incluyendo una generación centralizada, una composición química homogénea, una productividad constante (sin estacionalidad), no presentar usos actuales, tener un bajo precio (o nulo) y poder ser explotable con la tecnología actual. La Tabla A1 detalla estos criterios.

Tabla A1. Criterios deseables en torno a las materias primas potenciales para la producción de SAF.

Criterio	Descripción
Producción centralizada	La materia prima potencial se encuentra ubicada en una zona específica, en otras palabras, no está desagregada
Homogeneidad	La materia prima presenta una composición química homogénea que facilita su transformación en SAF, es decir, requiere poco o un nulo pretratamiento para ser estandarizada
Constancia	La producción de materia prima es constante a lo largo del año, es decir, no presenta estacionalidad
En desuso	No existen usos actuales para la materia prima, lo que permitiría su aprovechamiento para la producción de SAF
Precio	La materia prima potencial presenta un precio bajo o nulo. Idealmente, es posible obtener ingresos extra por su recolección
Técnicamente factible	El aprovechamiento de la materia prima puede realizarse mediante la tecnología actual
Factibilidad económica	La conversión de la materia prima en SAF debe ser económicamente viable

A3. CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD DE LAS MATERIAS PRIMAS POTENCIALES PARA LA PRODUCCIÓN DE SAF

La Tabla A2 resume los criterios de sostenibilidad de las materias primas potenciales para la producción de SAF definidos por la OACI (ICAO, 2025a).

Tabla A2. Criterios de sostenibilidad de las materias primas potenciales para la producción de SAF.

Criterio	Principio	Descripción
Emisiones de GEI		
1	Reducción de GEI	Reducción mínima del 10 % de las emisiones de ciclo de vida de GEI respecto al Jet A1 básico
2	Stock de carbono	No provenir de tierras con alto carbono convertidas después del 1 de enero de 2008 (bosques primarios, turberas, humedales). Si hay conversión directa post-2008, calcular emisiones de DLUC. En caso de superar el valor ILUC por defecto, usar el DLUC real
3	Permanencia en la reducción de emisiones de GEI	Se implementarán prácticas operativas para monitorear, mitigar y compensar cualquier incidencia material de no permanencia resultante de las actividades de captura y secuestro de carbono
Otros criterios ambientales		

Criterio	Principio	Descripción
4	Uso del agua / calidad del agua	Implementar prácticas que mantengan o mejoren la calidad del agua y uso eficiente de recursos hídricos (evitar sobreexplotación)
5	Conservación del suelo	Aplicar buenas prácticas agrícolas o forestales que mantengan o mejoren la salud y fertilidad del suelo
6	Contaminación del aire	Reducir al mínimo las emisiones contaminantes atmosféricas derivadas del cultivo o procesamiento
7	Biodiversidad y conservación	La producción de SAF no debe provenir de áreas protegidas o ecosistemas de alto valor natural, ni causar impactos adversos sobre ellos. Utilizar cultivos de bajo riesgo invasivo y controlar especies no nativas o microorganismos modificados
8	Residuos químicos	Implementar prácticas que minimicen la generación de residuos químicos, o el uso de pesticidas
9	Impactos sísmicos y vibracionales	En la producción de SAF se implementarán prácticas operativas para minimizar los impactos sísmicos, así como la energía acústica y los impactos vibratorios
Criterios socioeconómicos		
10	Derechos humanos y laborales	Cumplir los principios de la Organización Internacional del Trabajo: trabajo digno, no trabajo infantil o forzoso, igualdad de género, libertad sindical
11	Derechos sobre la tierra	Respetar los derechos de tenencia de tierra (formales o informales), incluyendo consentimiento libre, previo e informado (CLPI)
12	Derechos de uso del agua comunitario	Reconocer y respetar los derechos formales o consuetudinarios al uso del agua por las comunidades locales o indígenas
13	Desarrollo local y social	Contribuir al desarrollo social y económico local en zonas de pobreza
14	Seguridad alimentaria	No comprometer la disponibilidad de alimentos

A4. CARACTERÍSTICAS DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES EN EL PERÚ

El MINAM recolecta y analiza información referente a los RSU generados en el Perú. Para fines del presente estudio, dichos residuos fueron clasificados en tres grupos como: orgánicos, no orgánicos aprovechables (plásticos) y no orgánicos no aprovechables. La Tabla A3 muestra la clasificación de RSU según el MINAM, su clasificación para los fines del presente estudio y su poder calorífico y contenido de humedad. La Tabla A4 resume la generación de RSU y la producción potencial de SAF a partir de ellos por estado.

Tabla A3. Clasificación y características de los RSU en el Perú.

Residuo (clasificación del MINAM)	Orgánico	No orgánico aprovechable	No orgánico no aprovechable	Poder calorífico inferior en base seca [MJ/kg]	Humedad [%]
Residuos de alimentos	100%	0%	0%	9.00	65%
Residuos de maleza y poda	100%	0%	0%	14.50	45%
Otros residuos orgánicos	100%	0%	0%	10.00	55%
Papel blanco	100%	0%	0%	15.00	8%
Papel periódico	100%	0%	0%	13.00	8%
Papel mixto	100%	0%	0%	14.00	13%
Cartón blanco (liso y cartulina)	100%	0%	0%	15.00	8%
Cartón marrón (Corrugado)	100%	0%	0%	13.00	13%
Cartón mixto	100%	0%	0%	13.00	13%
Vidrio transparente	0%	0%	100%	0.00	0%
Vidrio otros colores (marrón, verde, azul, otros)	0%	0%	100%	0.00	0%
Vidrio otros (vidrio de ventana)	0%	0%	100%	0.00	0%
Tereftalato de polietileno	0%	100%	0%	31.50	0%
Polietileno de alta densidad	0%	100%	0%	32.00	0%
Polietileno de baja densidad	0%	100%	0%	32.00	0%
Polipropileno	0%	100%	0%	36.50	0%
Poliestireno	0%	100%	0%	37.50	0%
Policloruro de vinilo	0%	100%	0%	22.00	0%
Tetra brik (envases multicapa)	75%	20%	5%	15.00	15%
Lata (Hojalata)	0%	0%	100%	0.00	0%
Metales ferrosos (Acero + Fierro)	0%	0%	100%	0.00	0%
Aluminio	0%	0%	100%	0.00	0%
Otros Metales	0%	0%	100%	0.00	0%
Bolsas plásticas	0%	100%	0%	31.50	1%
Papel higiénico/Pañales/.toallas sanitarias	50%	50%	0%	14.00	50%
Pilas	0%	0%	100%	0.00	0%
Tecnopor (poliestireno expandido)	0%	100%	0%	32.50	1%
Residuos inertes (tierra, piedras, cerámicos, ladrillos, otros)	0%	0%	100%	0.00	0%
Textiles (telas)	35%	65%	0%	17.50	30%
Caucho, cuero, jebe	100%	0%	0%	30.50	8%
Restos de medicamentos	0%	0%	100%	0.00	30%

Residuo (clasificación del MINAM)	Orgánico	No orgánico aprovechable	No orgánico no aprovechable	Poder calorífico inferior en base seca [MJ/kg]	Humedad [%]
Envolturas de snacks, galletas, caramelos, entre otros	0%	100%	0%	26.50	5%
Otros residuos no categorizados	0%	0%	100%	13.00	25%

Tabla A4. Generación de RSU en el año 2023 y producción potencial de SAF en el Perú por estados. Datos de generación proporcionados por el MINAM.

Estado	Unidad	Generación de RSU				Producción potencial de SAF		
		Residuos orgánicos	Residuos plásticos	No apto para SAF	Total de RSU	SAF de RSU orgánicos	SAF de RSU plásticos	Total
Amazonas - Perú	kt	43	6	5	53	2	2	4
Ancash	kt	180	45	31	255	12	14	26
Apurímac	kt	43	12	9	65	3	4	7
Arequipa	kt	261	66	50	377	17	21	38
Ayacucho	kt	93	19	13	125	6	6	12
Cajamarca	kt	108	23	23	154	7	7	14
Callao	kt	278	76	32	386	17	21	37
Cusco	kt	168	39	30	237	10	12	22
Huancavelica	kt	25	7	6	39	2	2	4
Huanuco	kt	92	22	12	126	6	7	13
Ica	kt	189	61	37	287	12	19	32
Junín	kt	200	54	32	286	12	16	28
La Libertad	kt	355	81	80	516	23	27	50
Lambayeque	kt	220	57	45	322	16	17	33
Lima	kt	2 636	706	447	3 789	172	215	387
Loreto	kt	176	37	35	247	10	13	23
Madre De Dios	kt	44	7	4	55	2	2	5
Moquegua	kt	36	12	8	57	2	4	6
Pasco	kt	30	8	7	44	2	3	4
Piura	kt	344	85	85	514	24	27	51
Puno	kt	146	39	30	214	9	12	21
San Martín	kt	178	31	16	224	10	10	21
Tacna	kt	59	16	10	85	4	5	9
Tumbes	kt	45	13	14	73	3	4	8
Ucayali	kt	138	27	10	175	7	8	15
Total	kt	6 086	1 549	1 072	8 706	390	479	869

A5. CARACTERÍSTICAS DE LOS RESIDUOS AGRÍCOLAS

La Tabla A5 muestra el poder calorífico inferior y humedad de los residuos generados por los cultivos principales en el Perú. Los factores de residuos son tomados de (Reyes Chávez & Barrenechea Ramírez, 2022).

Tabla A5. Poder calorífico inferior y humedad de los residuos generados por los cultivos principales del Perú.

Cultivo	Residuo	Factor de residuo [kg/kg]	PCI [MJ/kg]	Humedad [%]	Referencias
Arroz	Paja	2.35	14.5	11.5%	(de Oliveira Maia et al., 2018; UPME, 2011)
Arroz	Cascarilla	0.2	15.7	10.5%	(UPME, 2011)
Cacao	Cascarilla	0.9	16.9	6.5%	(Hosnar & Navarro, 2018)
Cacao	Mucílago	0.02	16.9	85.0 %	(Hosnar & Navarro, 2018)
Café pergamino	Pulpa	0.44	16.8	77.5%	(UPME, 2011)
Café pergamino	Cascarilla	0.21	19.55	11.5%	(UPME, 2011)
Caña para alcohol	Hojas	3.26	15.75	32.5%	(UPME, 2011)
Caña para alcohol	Bagazo	2.68	18.4	46.0%	(UPME, 2011)
Caña para azúcar	Hojas	3.26	15.75	32.5%	(UPME, 2011)
Caña para azúcar	Bagazo	2.68	18.4	46.0%	(UPME, 2011)
Caña para etanol	Hojas	3.26	15.75	32.5%	(UPME, 2011)
Caña para etanol	Bagazo	2.68	18.4	46.0%	(UPME, 2011)
Espárrago	Peladilla	0.49	15.5	12.0%	(Nacional De Trujillo et al., 2013)
Palma aceitera	Fibra	0.63	17	15.0%	(UPME, 2011)
Plátano	Raquis	1	17	11.5%	(de Oliveira Maia et al., 2018; UPME, 2011)
Plátano	Vástago	5	15.4	11.5%	(de Oliveira Maia et al., 2018; UPME, 2011)

A6. DISTRIBUCIÓN DE TIPOS DE TIERRAS EN LOS DEPARTAMENTOS DEL PERÚ

Tabla A6. Distribución de tipos de tierras en los departamentos del Perú (Rau, 2019).

Departamento	Xérico	Hiper-árido	Árido	Semiárido	Sub-Húmedo	Húmedo	Hiper-húmedo	Hiper-hídrico	Hídrico
Amazonas	0%	0%	1%	1%	10%	18%	9%	53%	8%
Áncash	21%	12%	8%	11%	46%	2%	0%	0%	0%
Apurímac	0%	0%	1%	61%	38%	0%	0%	0%	0%
Arequipa	37%	19%	17%	27%	0%	0%	0%	0%	0%
Ayacucho	4%	12%	18%	51%	15%	0%	0%	0%	0%
Cajamarca	0%	5%	6%	12%	32%	30%	11%	2%	1%
Cusco	0%	0%	0%	20%	50%	22%	4%	5%	0%
Huancavelica	0%	6%	11%	42%	41%	0%	0%	0%	0%
Huánuco	0%	0%	0%	3%	40%	15%	24%	10%	7%
Ica	87%	10%	2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Junín	0%	0%	0%	8%	65%	27%	1%	0%	0%
La Libertad	27%	12%	6%	11%	39%	5%	0%	0%	0%
Lambayeque	47%	38%	9%	3%	3%	0%	0%	0%	0%
Lima	36%	17%	10%	21%	16%	0%	0%	0%	0%
Loreto	0%	0%	0%	0%	0%	0%	14%	59%	27%
Madre de Dios	0%	0%	0%	0%	12%	77%	3%	4%	4%
Moquegua	35%	16%	24%	24%	0%	0%	0%	0%	0%
Pasco	0%	0%	0%	0%	35%	27%	35%	1%	1%
Piura	19%	34%	24%	16%	5%	3%	0%	0%	0%
Puno	0%	0%	0%	36%	40%	19%	2%	3%	0%
San Martín	0%	0%	0%	1%	5%	29%	38%	3%	22%
Tacna	52%	18%	29%	2%	0%	0%	0%	0%	0%
Tumbes	0%	5%	47%	48%	0%	0%	0%	0%	0%
Ucayali	0%	0%	0%	0%	11%	52%	25%	6%	7%

A7. SUPUESTOS DE EVALUACIÓN TECNO-ECONÓMICA DE LA PRODUCCIÓN DE SAF

La Tabla A7 resume los supuestos considerados en la evaluación tecno-económica de la producción de SAF y otros combustibles a partir de varias materias primas. La tasa de cambio se asumió en PEN 3.53 por cada dólar.

Tabla A7. Supuestos en la evaluación tecno-económica de la producción de SAF y otros combustibles a partir de varias materias primas.

Parámetro	Unidad	RSU	Residuos agrícolas	Transición de etanol de caña	Transición de biodiesel de aceites vegetales
Depreciación	Años	20	20	20	20
Tasa de descuento	%	10%	10%	10%	10%
Inflación	%	2%	2%	2%	2%
Tasa impositiva corporativa	%	29.5%	29.5%	29.5%	29.5%
Factor salarial (Salario local:Salario en USA)	—	1:10	1:10	1:10	1:10
Precio de electricidad	USD/kWh	0.009	0.009	0.009	0.009
Precio del gas natural	USD/MMBtu	14.66	14.66	14.66	14.66
Precio del hidrógeno	USD/kg	1.77	1.77	1.77	1.77
Capacidad instalada de materia prima	kt/año	1 175	1 175	134 669	254 855
Rendimiento de destilado	%	19.95%	25.19%	55.69%	100%
Destilados (SAF:diésel:naphta)	—	50:30:20	50:30:20	70:20:10	79:7:6
Capacidad instalada	t/año de materia prima	1 175 167	1 175 167	134 669	254 855

A8. EJEMPLOS DE MODELOS DE NEGOCIO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE SAF

Para el cumplimiento del objetivo número 3 definido en el plan de acción (Tabla 19), es decir, el estudio de la viabilidad de implementación de casos de estudio empresarial, es necesario la conceptualización de modelos de negocio para el desarrollo de SAF. A continuación, se muestran ejemplos para el caso de la producción de SAF a partir de aceites residuales, RSU y cultivos bioenergéticos. Cualquier modelo de negocio para la implementación de SAF debe tener en cuenta la legislación vigente (Figura 43). Asimismo, los modelos conceptualizados pueden brindar información para el desarrollo de un marco legal específico para SAF.

A8.1 Producción de SAF a partir de aceites vegetales residuales

Para esta ruta, se sugiere la participación coordinada de los ministerios de Medio Ambiente (MINAM) y de la Producción, empresas consumidoras de aceites vegetales, empresas de acopio de aceites vegetales residuales, refinerías y aerolíneas. La Figura A1 resume el rol de estos actores a lo largo de la cadena de valor. Un elemento habilitante fundamental para esta ruta es la disponibilidad de estadísticas oficiales sobre la generación de aceites vegetales residuales, las cuales servirían como referencia para que los potenciales inversionistas y emprendedores puedan realizar una adecuada planificación logística y de abastecimiento de materia prima.

Con el objetivo de reducir la incertidumbre asociada a la disponibilidad y al costo del aceite vegetal residual, podrían implementarse medidas de carácter impositivo dirigidas a las empresas generadoras de este residuo (por ejemplo, hoteles, restaurantes y centros comerciales). Dichas medidas buscarían comprometer a estos actores a entregar el aceite vegetal residual, sin costo, a centros de acopio debidamente autorizados, a cambio de exenciones o beneficios fiscales. Bajo este esquema, el costo de provisión de la materia prima se limitaría principalmente a las actividades de recolección, transporte y limpieza del aceite previo a su transformación en refinerías mediante coprocesado.

Adicionalmente, sería recomendable que el modelo empresarial de los centros de acopio permita la participación de la ciudadanía u otras empresas como socios, bajo esquemas de capital accionario. Esto facilitaría el acceso a fuentes adicionales de financiamiento y contribuiría a la expansión de la capacidad de recolección. En este contexto, las aerolíneas podrían optar por estrategias de integración hacia atrás, invirtiendo en empresas de acopio de aceites vegetales residuales con el fin de obtener mayor certidumbre sobre la disponibilidad de materia prima y un mejor control de los costos asociados a la producción de SAF.

No obstante, el pináculo de esta ruta tecnológica y empresarial radica en la capacidad de recolectar el aceite vegetal usado generado por el ciudadano común, el cual representa una fracción significativa del potencial total de aceite vegetal residual, pero que actualmente presenta altos niveles de dispersión, informalidad y pérdidas. La incorporación efectiva de este flujo requeriría el diseño de esquemas específicos de recolección domiciliaria o puntos de entrega voluntaria, acompañados de campañas de sensibilización y mecanismos de incentivo económico o no económico. La integración del ciudadano en la cadena de suministro permitiría aumentar de manera sustancial la disponibilidad de materia prima y mejorar la viabilidad a largo plazo de la producción de SAF a partir de aceites vegetales residuales.

Gobierno

- Establecer estadísticas de generación de aceite vegetal residual
- Imposición a consumidores de aceites (hoteles, centros comerciales y restaurantes) el registro de consumo de aceite vegetal, así como del aceite vegetal residual generado
- Imposición a consumidores de aceites a tratar el aceite vegetal residual de manera apropiada (dándolo a centros de acopio)
- Explorar la posibilidad de eximir a consumidores de aceite de parte de sus impuestos por cada litro de aceite vegetal residual suministrado a un centro de acopio autorizado bajo el compromiso de no venderlo

Empresas consumidoras de aceites

- Dar registros de consumo de aceite y generación de aceite vegetal residual
- Proveer de aceite vegetal residual a centros de acopio

Empresas de acopio de aceites vegetales residuales

- Realizar recolección y limpieza de aceite vegetal residual
- Transferencia de aceite vegetal residual a refinerías

Refinerías

- Transformación de aceite vegetal residual a SAF por coprocesado

Aerolíneas

- Adquisición de SAF
- Integración hacia atrás (inversión a empresas de acopio de aceite vegetal residual)

Figura A1. Ejemplo de implementación de un modelo de negocio para la producción de SAF a partir de aceites residuales.

A8.2 Producción de SAF a partir de residuos sólidos urbanos

Para esta ruta, se sugiere la participación coordinada de los gobiernos nacionales y subnacionales, el ministerio de ambiente (MINAM), empresas recolectoras de RSU, empresas de reciclaje, instalaciones de tratamiento final, empresas de transformación de residuos a SAF y aerolíneas. La Figura A2 resume el rol de estos actores a lo largo de la cadena de valor.

Un elemento central para la viabilidad de esta ruta es la existencia de un sistema de gestión de RSU que permita la separación en origen y la trazabilidad de los flujos de residuos, en particular de las fracciones orgánica y plástica con potencial de valorización energética. En este contexto, el rol del gobierno resulta fundamental, tanto a través del cobro de tasas o impuestos destinados a financiar la recolección y gestión de los RSU, como mediante la implementación de incentivos para promover la separación de residuos en origen. Bajo este esquema, los flujos de papel y cartón, vidrio y metales podrían destinarse a cadenas de reciclaje existentes, mientras que los residuos orgánicos y una fracción de los residuos plásticos se orientarían a procesos de conversión a SAF. Los residuos no recuperables, por su parte, continuarían siendo gestionados mediante vertederos controlados y/o incineración, de acuerdo con la normativa ambiental vigente.

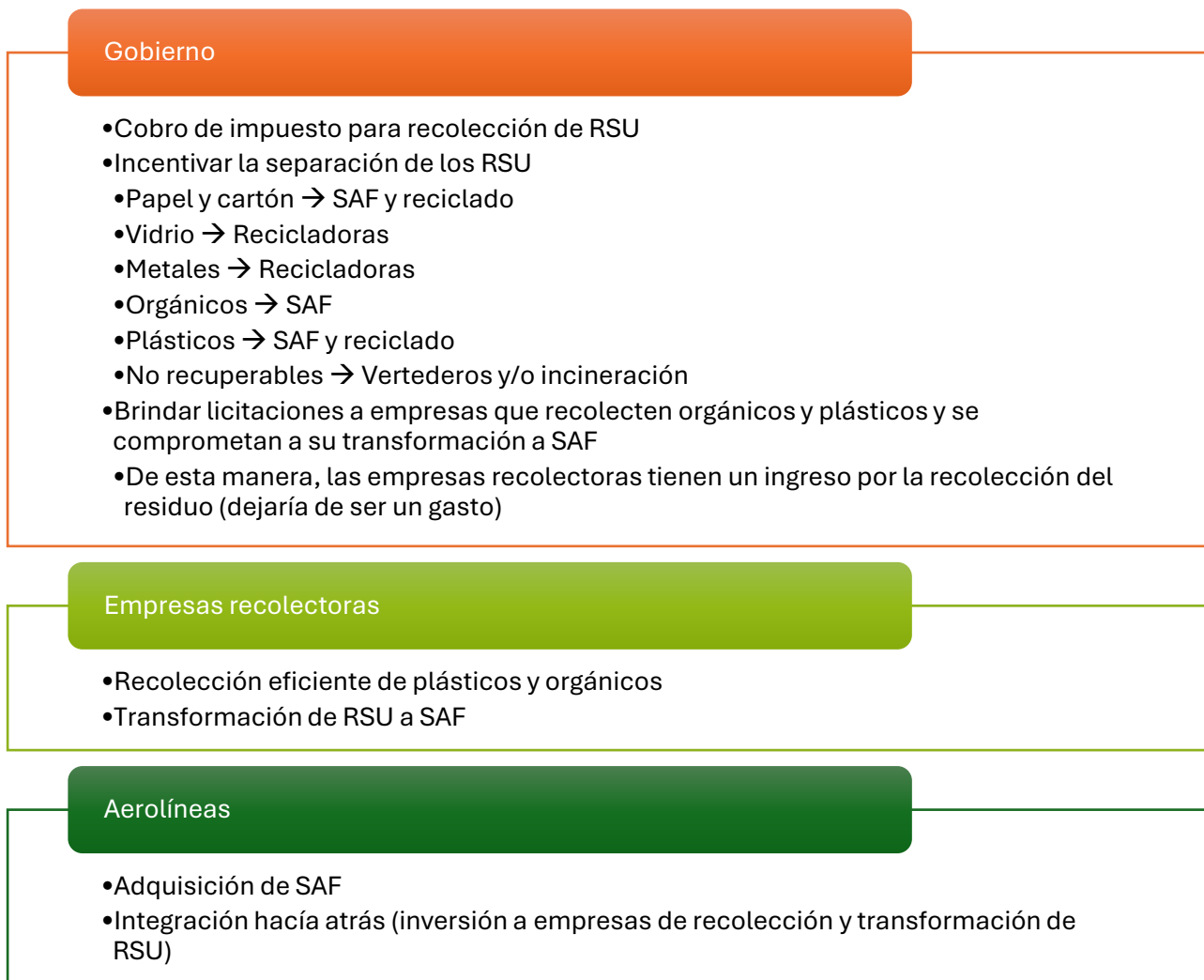


Figura A2. Ejemplo de implementación de un modelo de negocio para la producción de SAF a partir de RSU.

Con el fin de asegurar el suministro de materia prima para la producción de SAF y mejorar la eficiencia del sistema de gestión de residuos, el gobierno podría otorgar licitaciones o contratos de servicio a empresas recolectoras que se comprometan no solo a la recolección diferenciada de residuos orgánicos y plásticos, sino también a su transformación efectiva en SAF. Este enfoque permitiría que la recolección de dichas fracciones deje de representar un costo neto para las empresas recolectoras y pase a constituir una fuente de ingresos, alineando los incentivos económicos con los objetivos de valorización de residuos y descarbonización del sector aéreo. En este modelo, las empresas recolectoras asumirían un rol ampliado, integrando actividades de recolección eficiente, pretratamiento y transformación de residuos orgánicos y plásticos en SAF, ya sea de manera directa o a través de alianzas con operadores tecnológicos especializados. Esta integración vertical podría contribuir a reducir costos logísticos, mejorar la calidad de la materia prima y aumentar la trazabilidad de los residuos a lo largo de la cadena de valor.

Finalmente, las aerolíneas participarían como demandantes finales de SAF y podrían, adicionalmente, optar por estrategias de integración hacia atrás mediante la inversión directa en empresas de recolección y transformación de RSU, por lo que sería recomendable que el modelo empresarial de los centros de recolección permita la participación de la ciudadanía u otras empresas como socios, bajo esquemas de capital

accionario. Este tipo de participación permitiría a las aerolíneas reducir la incertidumbre asociada al suministro de SAF, asegurar volúmenes a largo plazo y fortalecer la viabilidad económica de esta ruta basada en la valorización de RSU.

A8.3 Producción de SAF a partir de cultivos bioenergéticos

Para esta ruta, se sugiere la participación coordinada del gobierno a través de los ministerios de medio ambiente (MINAM) y agricultura (MIDAGRI), productores agrícolas, empresas transformadoras de biomasa y aerolíneas, organizados bajo un esquema de clústeres agroindustriales que integren la producción de biomasa, su transformación y la demanda final de biocombustibles, en particular SAF. La Figura A3 resume el rol de estos actores a lo largo de la cadena de valor.

Un elemento habilitante clave para este modelo es la identificación y provisión, por parte del Estado, de terrenos no aptos para la agricultura convencional, los cuales pueden destinarse al establecimiento de cultivos energéticos sin generar competencia directa con la producción de alimentos. En este contexto, el gobierno desempeña un rol central no solo mediante la asignación o concesión de tierras marginales, sino también a través del diseño de instrumentos de política que incentiven la formación de clústeres entre productores agrícolas, empresas transformadoras y aerolíneas. Entre estos instrumentos destacan el acceso a créditos a tasas de interés preferenciales para los clústeres formalmente constituidos, así como el apoyo a inversiones en infraestructura básica (por ejemplo, acceso a agua, caminos rurales y logística), con el objetivo de reducir los costos de entrada y la percepción de riesgo asociada a nuevos esquemas productivos.

Por su parte, los productores agrícolas podrían organizarse en cooperativas o esquemas de *joint venture*, lo que permitiría reducir la incertidumbre individual, mejorar el poder de negociación y facilitar la adopción de nuevos cultivos energéticos. Dentro de este modelo, resulta clave el desarrollo de actividades de investigación y desarrollo orientadas a la identificación de variedades que se adapten a suelos marginales y condiciones climáticas locales, así como la adecuación progresiva de la infraestructura productiva necesaria para su establecimiento y cosecha. Adicionalmente, la integración directa de los productores dentro del clúster permitiría minimizar o eliminar la participación de intermediarios en la comercialización de la biomasa, reduciendo costos y aumentando la transparencia del mercado.

Las empresas transformadoras asumirían el rol de convertir la biomasa en biocombustibles bajo un enfoque de biorrefinería, priorizando el aprovechamiento integral de la materia prima y la diversificación de productos. Este enfoque permitiría mejorar la rentabilidad del sistema mediante la producción simultánea de SAF y otros bioproductos o co-productos, reduciendo la dependencia de un único mercado y aumentando la resiliencia económica del clúster.

Finalmente, las aerolíneas participarían como demandantes de SAF y como actores estratégicos dentro del clúster, pudiendo involucrarse mediante acuerdos de compra a largo plazo o inversión directa en las etapas agrícolas y de transformación. Esta participación permitiría reducir la incertidumbre asociada al suministro de SAF, facilitar la bancabilidad de los proyectos y alinear los incentivos económicos a lo largo de toda la cadena de valor.

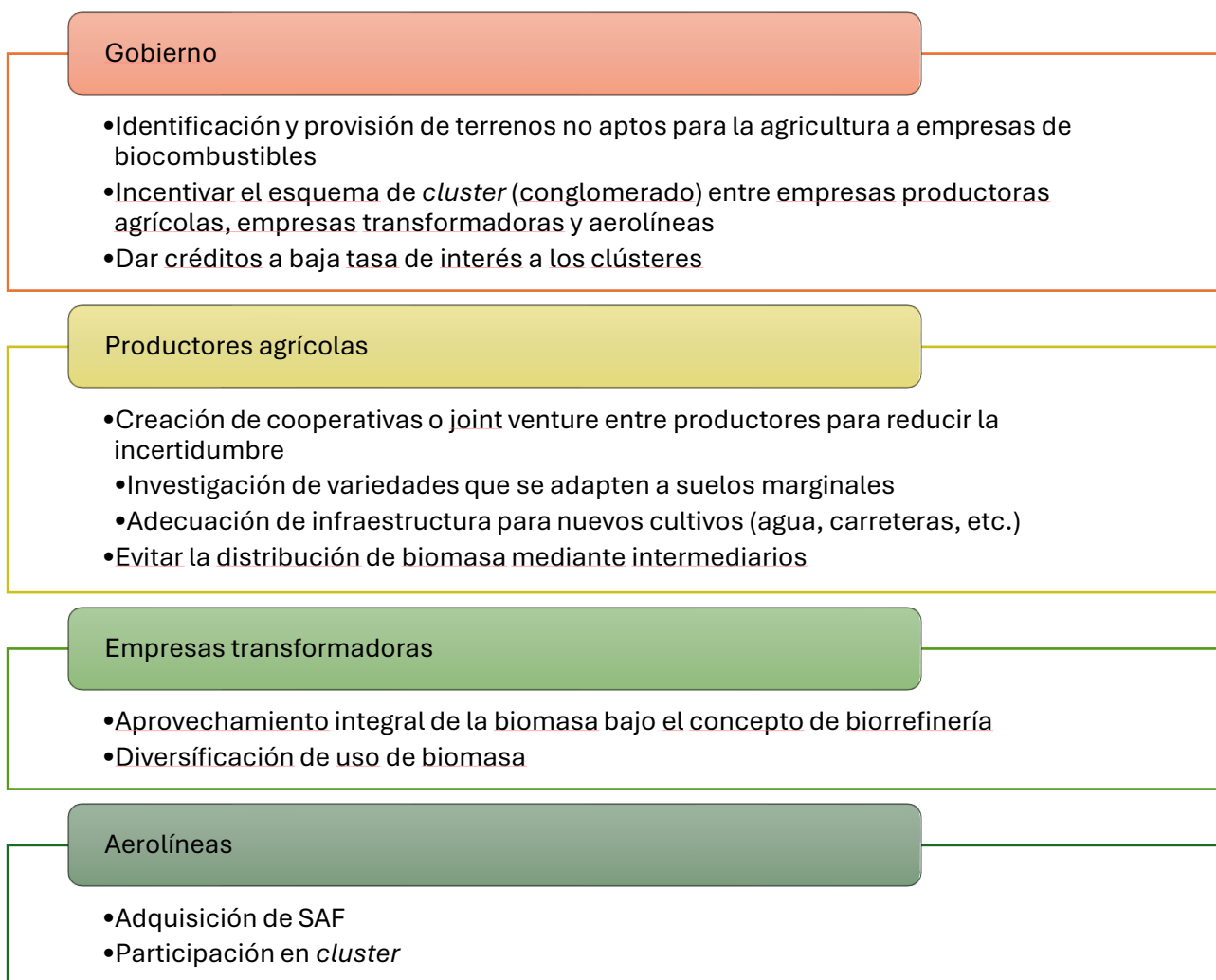


Figura A3. Ejemplo de implementación de un modelo de negocio para la producción de SAF a partir de cultivos bioenergéticos.

Un componente adicional de sostenibilidad financiera puede derivarse de estructurar la empresa resultante del clúster como una entidad que cotice en bolsa, lo cual permitiría movilizar capital no solo de los miembros productores y transformadores y de créditos bancarios, sino también de otras empresas e incluso de inversionistas individuales. La cotización pública facilitaría el acceso a recursos financieros diversificados, generando liquidez y permitiendo una expansión más rápida de las operaciones de producción y abastecimiento de SAF.

El enfoque de clúster industrial encuentra paralelos en la experiencia de conglomerados industriales en economías exportadoras, donde políticas públicas de apoyo y esquemas de coordinación sectorial contribuyeron a que grandes grupos empresariales con actividades interconectadas (como el caso del Hyundai Motor Group, un conglomerado multinacional de Corea del Sur con múltiples subsidiarias que cotizan en los mercados de valores) se consolidaran y accedieran a flujos de inversión global.