

PROYECTO DE APOYO A LA IMPLEMENTACIÓN DE ODS EN COLOMBIA:

FINANZAS PÚBLICAS, CRECIMIENTO SOSTENIBLE Y ENFOQUE DE GÉNERO

INVEST PACIFIC - ATCP 90

Determinar la viabilidad de
implementación de una planta
de SAF en el Valle del Cauca

Equipo Consultor:

Johan Martínez
Edgar Castillo

Fecha: 10 julio 2025

«La presente publicación ha sido elaborada con la asistencia de la Unión Europea. El contenido de la misma es responsabilidad exclusiva de los consultores y en ningún caso debe considerarse que refleja los puntos de vista de la Unión Europea».



Operado por:



CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	4
1.1. Objetivo del Documento	4
1.2. Alcance y Metodología	4
1.3. Alineación con la Hoja de Ruta Nacional de SAF en Colombia	4
2. CADENA DE VALOR DEL SAF A PARTIR DE CAÑA DE AZÚCAR EN EL VALLE DEL CAUCA.....	5
2.1. UPSTREAM: Materias primas	5
2.1.1. Biomasa de caña de azúcar.....	5
2.1.2. Bioetanol de caña de azúcar.....	5
2.1.3. Sostenibilidad y certificación de materias primas.....	6
2.1.4. Logística de recolección y pretratamiento.....	6
2.2. MIDSTREAM: Producción de SAF	6
2.2.1. Tecnologías de conversión a SAF	6
2.2.2. Insumos críticos	6
2.2.3. Potenciales plantas de producción en el Valle del Cauca	7
2.3. DOWNSTREAM: Distribución y uso final	7
2.3.1. Almacenamiento y mezcla con Jet A-1	7
2.3.2. Transporte a aeropuertos.....	7
2.3.3. Suministro y despacho en Aeropuerto	8
2.3.4. Consumidores	8
2.4. Ecosistema habilitador y servicios transversales	8
2.4.1. Marco Regulatorio y Políticas:.....	8
2.4.2. Financiación e Inversión:.....	8
2.4.3. Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) y Capital Humano:	8
2.4.4. Gobernanza y Colaboración:.....	8
3. IDENTIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE INCIDENCIA DE STAKEHOLDERS CLAVE EN EL VALLE DEL CAUCA	10
4. MAPEO DE POTENCIALES FOCOS DE DEMANDA DE SAF EN LA UNIÓN EUROPEA.....	15
4.1. Regulación de la Unión Europea	15
4.1.1. ReFuelEU Aviation.....	15
4.1.2. Directiva de Energías Renovables (RED III)	16
4.1.3. Sistema de Comercio de Emisiones de la Unión Europea (EU ETS)..	16

4.2.	Aerolíneas europeas como potenciales clientes	17
4.3.	Mercados HUB y Países con Estrategias SAF en la Unión Europea	18
4.4.	Mecanismos facilitadores	18
4.4.1.	Book and Claim.....	19
4.4.2.	Acuerdos de compra (Offtake Agreements).....	19
4.5.	Requisitos de sostenibilidad para el acceso al mercado de la Unión Europea	19
5.	CONSIDERACIONES CLAVE Y RECOMENDACIONES PARA EL DESARROLLO DE LA CADENA DE VALOR SAF EN EL VALLE DEL CAUCA...	21
5.1.	Establecer una Gobernanza Regional Efectiva y con Liderazgo.....	21
5.2.	Construir un Marco Regulatorio y de Incentivos.....	21
5.3.	Fortalecer la Cadena de Suministro desde el Origen (Upstream).....	22
5.4.	Impulsar la Inversión en Capacidad Productiva (Midstream)	22
5.5.	Preparar la Infraestructura de Distribución y Uso (Downstream)	23
5.6.	Desarrollar el Mercado y Asegurar la Demanda	23
5.7.	Fortalecer el Capital Humano y la Innovación	24
6.	CONCLUSIONES.....	25
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	27
ANEXO A: RESUMEN DEL REGLAMENTO REFUEL EU AVIATION Y SU RELEVANCIA PARA EL PROYECTO.....		29
1.	Objetivo Principal del Reglamento	29
2.	Elementos Clave de ReFuelEU Aviation.....	29
3.	Relevancia para el proyecto (ATCP 90).....	29
ANEXO B: RESUMEN DE LA DIRECTIVA DE ENERGÍAS RENOVABLES (RED III) Y SU RELEVANCIA PARA EL PROYECTO		31
1.	Objetivo Principal de la Directiva	31
2.	Elementos Clave de la RED III (Relevantes para SAF)	31
3.	Relevancia para el proyecto (ATCP 90).....	31
ANEXO C: MECANISMO DE REGISTRO Y RECLAMO (BOOK AND CLAIM) PARA SAF		33
1.	Resumen General del Mecanismo.....	33
2.	Grado de Desarrollo del Mecanismo.....	34

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Objetivo del Documento

El presente documento tiene como objetivo principal identificar y describir la cadena de valor potencial para la producción de Combustible Sostenible para Aeronaves (SAF) en el departamento del Valle del Cauca, Colombia. Se enfoca específicamente en las vías tecnológicas que utilizan biomasa de caña de azúcar (Residuos Agrícolas de Cosecha - RAC) y etanol de caña de azúcar (bioetanol) como materias primas. Adicionalmente, se identificarán los stakeholders clave involucrados, se analizará su incidencia, y se realizará un mapeo de los potenciales focos de demanda de este SAF en la Unión Europea, todo ello enmarcado en los Términos de Referencia (TdR) de la ATCP 90.

1.2. Alcance y Metodología

Este análisis se basa en la revisión de los TdR del proyecto, el "Estudio e Informe del Impacto Asociado a la Cadena de Suministro de Combustible para la Aviación Civil, con Énfasis en la Integración de los SAF" de la Aeronáutica Civil (Aerocivil, enero 2025), la "Hoja de Ruta de los Combustibles Sostenibles de Aviación en Colombia" (Aerocivil, enero 2025), y documentos de referencia internacionales sobre hojas de ruta y políticas SAF de Chile, España, Italia, la Unión Europea en general, Estados Unidos y la IATA. Se estructura la cadena de valor en sus eslabones principales, identificando actores, procesos y necesidades específicas para el contexto del Valle del Cauca.

1.3. Alineación con la Hoja de Ruta Nacional de SAF en Colombia

Este documento se alinea con los pilares y ejes de actuación definidos en la "Hoja de Ruta de los Combustibles Sostenibles de Aviación en Colombia"¹ de la Aerocivil. Busca "aterrizar" y detallar las implicaciones de dicha hoja de ruta para una región con alto potencial agroindustrial como el Valle del Cauca, contribuyendo a las metas nacionales de producción de SAF (100 millones de galones/año para 2035 y 450 millones para 2050) y al posicionamiento de Colombia como un actor relevante en el mercado global de SAF.

¹ Publicada en enero de 2025

2. CADENA DE VALOR DEL SAF A PARTIR DE CAÑA DE AZÚCAR EN EL VALLE DEL CAUCA

Para realizar el análisis de la cadena de valor se dividieron los actores de acuerdo con su rol dentro del proceso del SAF. De esta manera, se tiene una sección de “*UPSTREAM*” donde se encuentran los actores relacionados con la producción y tratamiento de la materia prima, en este caso la caña de azúcar y sus biomasaas asociadas. La siguiente sección corresponde a la de “*MIDSTREAM*” donde se detallarán los actores relacionados con la producción de SAF, los productores de la tecnología e insumos. Seguidamente se identificarán los actores del “*DOWNSTREAM*” que corresponden a quienes intervienen en la distribución y consumo final del SAF. Finalmente, se analizarán todos los actores de servicios transversales para la cadena.

2.1. UPSTREAM: Materias primas

2.1.1. Biomasa de caña de azúcar

- **Materia prima:** Bagazo, hojas, cogollos y otros residuos de cosecha. El Valle del Cauca es el departamento con mayor producción, sin embargo, el norte del departamento de Cauca también podría ser un proveedor en caso de que la planta de SAF se ubicase cerca del aeropuerto.
- **Actores:** Cultivadores de caña, ingenios azucareros, agremiaciones representantes (Asocaña, Procaña, Azucari). La caña de azúcar se cultiva bajo diferentes modalidades que van desde el cultivo en tierras propias (ingenios y cultivadores de caña), cultivo en tierras arrendadas y en un esquema de cuentas en participación. De acuerdo con Asocaña, aproximadamente el 50% de la caña cultivada está a cargo de los ingenios azucareros bajo los modelos de tierras propias, arrendamiento y cuentas en participación².
- **Procesos:** Recolección de RAC (manual o mecanizada), pretratamiento (secado, secado parcial, triturado), empacado.

2.1.2. Bioetanol de caña de azúcar

- **Materia prima:** En el país la producción de alcohol se realiza utilizando jugo de caña de azúcar, mieles intermedias de la producción de azúcar y mieles finales.

² El modelo de cuentas en participación se refiere a tipo de contrato donde las partes aportan bienes (la tierra) y servicios (labores culturales) y ambos participan de las ganancias o pérdidas resultantes del ejercicio.

- **Actores:** Ingenios que tienen producción dual, es decir que producen de manera simultánea azúcar y alcohol, gracias a que cuentan con una destilería anexa al ingenio azucarero. En el valle del río Cauca los que cumplen con esta característica son Incauca, Mayagüez, Manuelita, Providencia, Riopaila e Ingenio Risaralda.
- **Procesos:** Molienda de caña, clarificación de jugos, fermentación, destilación y deshidratación, para la obtención de bioetanol anhidro.

2.1.3. Sostenibilidad y certificación de materias primas

- **Procesos:** La implementación de buenas prácticas agrícolas es fundamental. Estas deben estar definidas para dar cumplimiento a los requisitos exigidos por los diferentes estándares para SAF: CORSIA y eventualmente los europeos (RED III).
- **Actores:** Cultivadores de caña. Ingenios, entidades certificadoras (ISCC, RSB y otras interesadas como Bonsucro e Icontec).

2.1.4. Logística de recolección y pretratamiento

- **Procesos:** Transporte del bioetanol desde las destilerías hacia la planta de SAF, transporte del RAC desde el campo hasta los centros de acopio, ingenio o planta de SAF directamente. Eventualmente puede ser necesario un pretratamiento del RAC como la peletización, briqueteado o torrefacción.
- **Actores:** Empresas de transporte logístico de RAC, bioetanol, empresas encargadas del pretratamiento requerido.

2.2. MIDSTREAM: Producción de SAF

2.2.1. Tecnologías de conversión a SAF

- **Biomasa a SAF:**
 - Vía gasificación + Fischer Tropsch (FT)
 - Vía enzimática en la ruta Alcohol to Jet (AtJ)
- **Bioetanol a SAF:** Vía AtJ.

2.2.2. Insumos críticos

- **Hidrógeno:** Es requerido para el proceso de producción de SAF. El ideal corresponde a hidrógeno verde. En la región no hay producción de hidrógeno que pueda estar disponible para el proyecto. Esto abre la oportunidad a que se cree un actor nuevo para esta cadena.
- **Energía:** La matriz energética de la región es relevante para la operación de la planta de SAF. Idealmente esta energía debe ser renovable, aunque la matriz

colombiana suministra una energía suficientemente baja en emisiones que es aceptable para el proyecto.

- **Catalizadores:** De acuerdo con los requerimientos de cada tecnología.

2.2.3. Potenciales plantas de producción en el Valle del Cauca

- **Actores:** Es importante destacar que se pueden configurar múltiples alternativas para hacer una inversión en una planta de SAF para la región.
 - **Nuevos inversionistas:** Un inversionista que no sea de la región, que no necesariamente participe del downstream y que encuentre una alternativa atractiva. Aquí pueden existir empresas que tengan producción de SAF en otros países, que participen en otros eslabones de la cadena, hagan parte de otras industrias, sean proveedores de tecnología o fondos de inversión buscando alternativas en biocombustibles.
 - **Empresas de la región:** Pueden ser empresas vinculadas a la cadena productiva que de manera individual o mediante alianzas o sociedades puedan constituir la inversión para la planta de SAF. Estas empresas pueden ser ingenios, empresas de energía o proveedores de tecnología.
 - **Ecopetrol:** Dentro de la estrategia de Ecopetrol se encuentra la producción de SAF. Ya ha habido lotes experimentales de coproducción en la refinería y hay evaluaciones en proceso para producir SAF mediante otras rutas tecnológicas.
- **Ubicación:** En la región existen alternativas atractivas de ubicación. Idealmente debe estar cerca de alguno de los eslabones de la cadena productiva. Cerca del aeropuerto existen productores de materia prima, de bioetanol, distribuidores de combustible.

2.3. DOWNSTREAM: Distribución y uso final

2.3.1. Almacenamiento y mezcla con Jet A-1

- **Procesos:** Almacenamiento del SAF puro (conocido también como “neat SAF”), mezcla con JET A-1, certificación de la mezcla.
- **Actores:** Planta productora de SAF, Distribuidores mayoristas de combustible, o empresas que realicen el proceso de mezcla de forma independiente.
- **Infraestructura:** Terminales de almacenamiento de combustible, tanques adecuados para la recepción del SAF puro y tanques para el almacenamiento del producto mezclado (SSJF).

2.3.2. Transporte a aeropuertos

- **Procesos:** Transporte del SAF mezclado (SSJF) desde el punto de almacenamiento o punto de mezcla hasta el Aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón, mediante carrotanques.
- **Actores:** Distribuidores mayoristas o empresas dedicadas.

2.3.3. Suministro y despacho en Aeropuerto

- **Procesos:** Recepción, control de calidad, almacenamiento en las instalaciones del aeropuerto y suministro a las aeronaves.
- **Actores:** Operadores de servicios de suministro en rampa (EDS), operador del aeropuerto.
- **Infraestructura:** Adaptación o nueva infraestructura de almacenamiento y despacho.

2.3.4. Consumidores

- **Proceso:** Utilización del SAF en la operación de las aeronaves. Participación del mecanismo de “Book and Claim”
- **Actores:** aerolíneas, asociaciones representantes

2.4. Ecosistema habilitador y servicios transversales

2.4.1. Marco Regulatorio y Políticas:

- **Actores:** Gobierno Nacional (Ministerio de Minas y Energía, Ministerio de Transporte, Aeronáutica Civil, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Unidad de Planificación Rural Agropecuaria - UPRA, Comisión de Regulación de Energía y Gas - CREG), Gobierno Departamental del Valle del Cauca.
- **Acciones:** Aplicación de la Hoja de Ruta Nacional, desarrollo de incentivos fiscales y financieros, agilización de permisos, establecimiento de estándares de calidad y sostenibilidad.

2.4.2. Financiación e Inversión:

- **Actores:** Banca nacional e internacional, fondos de inversión, banca de desarrollo (BID, Bancoldex, Banco Europeo de Inversiones - BEI), Ecopetrol, sector privado (empresas de la región, de la cadena, proveedores de tecnología), Invest Pacific.
- **Acciones:** Creación de instrumentos para atraer inversión para la(s) planta(s), desarrollo de materias primas, creación de empresas especializadas en servicios como pretratamiento y logística.

2.4.3. Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) y Capital Humano:

- **Actores:** Universidades del Valle del Cauca (Univalle, Javeriana Cali, ICESI, etc.), SENA regional, centros de investigación (Cenicaña, CIAT, entre otros), proveedores de tecnología (internacionales y locales).
- **Acciones:** Investigación en optimización de recolección, transporte y pretratamiento de RAC, nuevas variedades de caña, procesos de conversión, formación de técnicos y profesionales.

2.4.4. Gobernanza y Colaboración:

- **Actores:** Comité de Seguimiento Nacional de SAF, Mesa SAF Regional del Valle del Cauca (propuesta), Asocaña, Aerocivil, Fuerza Aérea, IATA, Clúster

Aeroespacial del Pacífico y asociaciones como SODICOM, COMCE y la Asociación Colombiana de Petróleo - ACP.

- **Acciones:** Coordinación interinstitucional, alianzas público-privadas, participación ciudadana.

3. IDENTIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE INCIDENCIA DE STAKEHOLDERS CLAVE EN EL VALLE DEL CAUCA

En la siguiente tabla se listan los stakeholders clave en el Valle del Cauca. Se especifican también los roles que tienen dentro de la cadena de valor y se identifican tanto los intereses que puedan tener, así como el grado de influencia que tienen para que el proyecto se lleve a cabo. Se hace una valoración cualitativa tanto de los intereses como de la influencia y se especifican los temas más relevantes para estos dos aspectos. En la última columna, se presentan las diferentes necesidades y/o temas que sean de relevancia para el análisis y viabilidad del proyecto.

Tabla 1: Identificación y Análisis de Incidencia de Stakeholders Clave en el Valle del Cauca para la producción de SAF

STAKEHOLDER	ROL EN LA CADENA DE VALOR	INTERÉS	INFLUENCIA	INCIDENCIA / NECESIDADES CLAVE
Proveedores de caña	Proveedores de materia prima (para etanol, RAC).	Alto * Diversificación de ingresos * Valorización de residuos	Alta * Volumen de producción * Adopción de prácticas sostenibles * Adopción de certificaciones	* Incentivos para recolección de RAC * Asistencia técnica para adoptar prácticas de sostenibilidad * Adopción de certificaciones, apoyo técnico y económico * Discusión de precios sobre la materia prima
Ingenios Azucareros / Asocaña	* Productores de bioetanol * Proveedores de RAC (manejo directo del 50% de la tierra sembrada en caña) * Operadores del 100% de la cosecha * Potenciales inversionistas y operadores de plantas SAF	Muy alto: * Nuevo mercado estratégico para producto existente * Cumplimiento de exigencias ambientales * Competitividad	Muy alta: * Operación de la cosecha del 100% de la caña * Capacidad industrial * Cultura de sostenibilidad * Capacidad de I+D+i	* Claridad y estabilidad regulatoria (experiencia con alcohol carburante) * Incentivos fiscales y financieros para reducir el monto de la inversión y mejorar la competitividad * Certificaciones para aprovechar ventajas de la caña del Valle
Potenciales productores y/o inversionistas	Desarrollo de operación de SAF en la cadena (tecnología AtJ con etanol actual y/o celulósico)	Muy Alto * Oportunidad de nuevo mercado * Retorno de inversión * Gestión de riesgo	Media Dependencia de: * Marco regulatorio * Acceso a capital * Acceso a tecnología	* Claridad y estabilidad regulatoria * Incentivos fiscales y financieros * Fast Track de permisos

STAKEHOLDER	ROL EN LA CADENA DE VALOR	INTERÉS	INFLUENCIA	INCIDENCIA / NECESIDADES CLAVE
				* Esquema de contratación en firme
Gobierno nacional: Ministerios, Aerocivil, CREG, entre otros	<ul style="list-style-type: none"> * Definición de políticas. * Regulación técnica y de calidad. * Establecimiento de incentivos. * Facilitar y simplificar procesos de registros y obtención de permisos. * Supervisión del cumplimiento de requisitos técnicos y de calidad. 	Muy Alto <ul style="list-style-type: none"> * Metas de descarbonización y transición energética * Desarrollo industrial * Seguridad energética 	Muy Alta <ul style="list-style-type: none"> * Rama ejecutiva * Relación directa con rama legislativa 	<ul style="list-style-type: none"> * Implementación de Hoja de Ruta * Coordinación con actores regionales * Armonización regulatoria * Promoción de la inversión
Gobierno departamental y municipal	<ul style="list-style-type: none"> * Promoción de la inversión * Desarrollo de infraestructura regional * Permisos * Estímulos tributarios 	Alto <ul style="list-style-type: none"> * Desarrollo económico regional * Generación de empleo * Sostenibilidad * Posicionamiento regional 	Media – Alta <ul style="list-style-type: none"> * Competencias regionales * Articulación con actores 	<ul style="list-style-type: none"> * Alineación de planes regionales con industria de SAF * Apoyo en logística e infraestructura * Formación de capital humano
Aerolíneas / IATA	<ul style="list-style-type: none"> * Consumidores finales de SAF * Impulsores de demanda. 	Alto <ul style="list-style-type: none"> * Metas de descarbonización * Imagen * Cumplimiento de 	Alta <ul style="list-style-type: none"> * Principales demandantes * Capacidad de firmar contratos 	<ul style="list-style-type: none"> * Precio competitivo * Amplia disponibilidad de producto * Book and Claim operativo y accesible

STAKEHOLDER	ROL EN LA CADENA DE VALOR	INTERÉS	INFLUENCIA	INCIDENCIA / NECESIDADES CLAVE
		estándar de CORSIA * Participación del mecanismo de Book and Claim		* Infraestructura de suministro en aeropuerto
Aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón	Proveedor de infraestructura para recepción, almacenamiento y despacho de SAF	Medio – Alto * Ajustar portafolio de servicios con oferta de SAF * Sostenibilidad y descarbonización	Media * Control de infraestructura aeroportuaria	* Inversión para adaptación / construcción de infraestructura para SAF (Podría ser incluso mezcla)
Distribuidores mayoristas de combustible	* Intermediación * Almacenamiento * Mezcla con Jet A1 * Transporte a aeropuerto	Medio – Alto * Nuevo producto * Margen de intermediación * Cumplimiento de posibles mandatos o requerimientos de mezcla	Alta * Control de infraestructura de distribución existente * Poder de negociación (según las condiciones que se establezcan en la reglamentación)	* Claridad en rol * Incentivos para adaptar la infraestructura de mezcla * Definición de estándares de calidad y control de la misma
Sector financiero: * Bancos * Fondos * Banca de fomento y multilateral	Proveedores de capital para el desarrollo de proyectos.	Medio * Oportunidad de inversión en sector verde	Media – Alta * Decisiones de financiación son determinantes para la viabilidad de los proyectos	* Requerimiento de proyectos bien estructurados * Mitigación de riesgos: político, mercado, tecnológicos * Incentivos que mejoren rentabilidad y agilicen retorno de la inversión

STAKEHOLDER	ROL EN LA CADENA DE VALOR	INTERÉS	INFLUENCIA	INCIDENCIA / NECESIDADES CLAVE
Academia y centros de investigación	* Investigación * Desarrollo tecnológico * Formación de capital humano	Medio – Alto * Oportunidades de investigación y formación * Acceso a nuevas tecnologías	Media * Generación de conocimiento y talento	* Financiación para I+D+i * Programas de formación específicos para SAF * Articulación con la industria
Comunidades Locales y Sociedad Civil	Receptores de impactos socioeconómicos y ambientales.	Alto * Empleo * Desarrollo local * Calidad ambiental	Variable * Depende de las organizaciones y la participación	* Necesidad de participación * Garantías de beneficios sociales: Empleo, desarrollo rural, transparencia

4. MAPEO DE POTENCIALES FOCOS DE DEMANDA DE SAF EN LA UNIÓN EUROPEA

El desarrollo de una industria de exportación de Combustible Sostenible de Aviación (SAF) desde el Valle del Cauca requiere una comprensión detallada de los mercados de destino, para que desde un principio se configure con las características necesarias para atenderlos. La Unión Europea (UE) se presenta como el principal foco de demanda a corto y mediano plazo, debido a su marco regulatorio robusto y a los objetivos de descarbonización de sus Estados miembros y su industria aeronáutica.

Los principales factores que influyen en el crecimiento del mercado en Europa están relacionados con las distintas regulaciones, los requerimientos de las aerolíneas como principales consumidores del SAF, las estrategias de optimización de operaciones, el mecanismo de “Book and Claim” y el cumplimiento de los estándares ambientales y de sostenibilidad.

4.1. Regulación de la Unión Europea

En la Unión Europea el desarrollo del mercado de SAF está determinado por las exigencias regulatorias y no como un acto voluntario de los consumidores. Los dos instrumentos regulatorios principales son el reglamento de ReFuelEU Aviation y la Directiva de Energías Renovables (RED III). En este apartado expondremos los elementos principales que permiten proyectar el mercado Europeo como uno de interés. Es importante mencionar que estas directivas son mucho más completas y tienen más elementos. En los Anexos A y B, se presenta un poco más de información relevante.

4.1.1. ReFuelEU Aviation

- **Efecto Directo:** Establece mandatos de mezcla obligatorios para los proveedores de combustible en los principales aeropuertos de la Unión Europea. Esto crea una demanda garantizada y creciente.
 - **2025:** 2% del combustible de aviación debe ser SAF.
 - **2030:** 6% de SAF, con un sub-mandato de 1.2% para e-fuels (combustibles sintéticos).
 - **Crecimiento Sostenido:** Las cuotas aumentan progresivamente cada cinco años, llegando al 70% en 2050 (con un 35% de e-fuels).
- **Medida Anti-Tanker:** Obliga a las aerolíneas a cargar al menos el 90% del combustible necesario para sus vuelos en los aeropuertos de la UE, evitando que carguen combustible más barato en otros lugares para eludir el mandato.
- **Relevancia para el Valle:** Cualquier volumen de SAF producido en el Valle del Cauca que sea exportado a un proveedor en la UE contribuirá directamente a que este cumpla su obligación, creando un mercado tangible para la producción colombiana.

4.1.2. Directiva de Energías Renovables (RED III)

- **La "Licencia para Operar":** Define qué es un SAF elegible. Para que el SAF del valle del río Cauca pueda ser vendido en la UE, debe cumplir los criterios de sostenibilidad de esta directiva.
- **Criterios Clave:**
 - **Reducción de GEI:** Mínimo del 70% en comparación con el combustible fósil para nuevas instalaciones.
 - **Materias Primas:** Prohíbe el uso de cultivos alimentarios y forrajeros. Favorece explícitamente las materias primas listadas en su Anexo IX, que incluye residuos (como el RAC de la caña) y biocombustibles avanzados (como el etanol celulósico).
 - **Uso del Suelo:** Prohíbe materias primas de tierras con altas reservas de carbono o alta biodiversidad (bosques primarios, humedales, etc.).
- **Relevancia para el Valle:** Es crucial que la producción de SAF a partir de caña de azúcar (etanol y RAC) en el Valle del Cauca sea certificada bajo un esquema reconocido por la UE (como ISCC EU o RSB EU RED) que verifique el cumplimiento de estos criterios.

4.1.3. Sistema de Comercio de Emisiones de la Unión Europea (EU ETS)

El Sistema de Comercio de Emisiones de la UE (EU ETS) es uno de los principales instrumentos de la política climática europea y genera un fuerte incentivo económico que impacta positivamente la demanda de SAF. Es un mercado de carbono basado en el principio de "*cap and trade*", diseñado para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de manera costo-efectiva.

El mecanismo opera sobre dos elementos fundamentales:

1. Techo de Emisiones (Cap):

El techo es definido a través del proceso legislativo de la Unión Europea, mediante acuerdo entre la Comisión Europea, el Parlamento Europeo y el Consejo de la UE. No es una decisión de un solo país, sino una política unificada para todo el bloque. No hay un techo numérico fijo, sino un tope total a los derechos de emisión que se reduce anualmente de forma progresiva y predecible. Con la reforma del paquete "Fit for 55", este tope se reduce cada año a un ritmo acelerado, garantizando que los derechos de emisión sean cada vez más escasos y valiosos. Para 2025, el total de derechos disponibles en el sistema se reduce en un 4.3% respecto a 2024. Específicamente para la aviación, el cambio más significativo es la eliminación total de los derechos de emisión gratuitos a partir de 2026. Desde ese año, las aerolíneas deben comprar en el mercado el 100% de los derechos necesarios para cubrir sus emisiones en vuelos dentro del Espacio Económico Europeo.

2. Derechos de Emisión y Mercado (Trade):

Un derecho de emisión es un permiso para emitir una tonelada de CO₂. Estos derechos son creados y distribuidos por la Comisión Europea y los Estados miembros a través de subastas en una plataforma común europea. Las empresas compran estos derechos para poder operar.

Al final de cada año, cada aerolínea debe entregar un número de derechos de emisión igual a sus emisiones verificadas. Si una aerolínea emite más de los derechos que posee, debe comprar más en el mercado. Si emite menos, puede vender sus derechos sobrantes.

El Rol del SAF como Incentivo Económico:

El SAF es la principal herramienta que tienen las aerolíneas para reducir su obligación financiera dentro del EU ETS. Cuando una aerolínea utiliza SAF que cumple con los criterios de sostenibilidad de la UE, esa porción de combustible se considera de cero emisiones netas en la combustión a efectos del sistema.

Esto significa que no emitir se refleja directamente en un costo evitado para las compañías. Cada tonelada de CO₂ que no se emite gracias al uso de SAF es una tonelada por la cual la aerolínea no tiene que comprar y entregar un derecho de emisión. Con precios de los derechos que pueden superar los € 80-100 por tonelada en los últimos años³, este ahorro se convierte en un subsidio implícito que ayuda a compensar el mayor costo del SAF en comparación con el combustible convencional.

De esta manera, el SAF no es solo una alternativa técnica, sino también una estrategia financiera fundamental para que las aerolíneas gestionen su exposición al creciente costo del carbono en Europa.

4.2. Aerolíneas europeas como potenciales clientes

Adicionalmente a las obligaciones, las aerolíneas tienen sus propios planes de descarbonización mediante la implementación de diferentes estrategias.

- **Objetivos Corporativos de Descarbonización:** Grupos aéreos como IAG (Iberia, British Airways), Air France-KLM, Lufthansa Group y aerolíneas de bajo costo como Ryanair y EasyJet tienen metas de uso de SAF que a menudo superan los mandatos iniciales. Buscan asegurar el suministro a largo plazo para garantizar su "licencia para crecer".
- **Acuerdos de Compra (Offtake Agreements):** Las aerolíneas están firmando activamente acuerdos de compra a largo plazo para asegurarse volúmenes futuros de SAF. Estos acuerdos son vitales para que los productores obtengan la financiación necesaria para construir nuevas plantas. Un productor en el

³ EMBER Climate

Valle del Cauca podría buscar este tipo de acuerdos con aerolíneas europeas, especialmente aquellas con fuerte presencia en rutas hacia América Latina, como por ejemplo Iberia, Air Europa, Lufthansa, KLM y Air France.

- **Beneficios del EU ETS:** Como se explicó anteriormente, el uso de SAF elegible reduce la cantidad de derechos de emisión que las aerolíneas deben comprar y entregar, creando un incentivo económico directo. El ahorro puede ser de entre 200 y 300 € por tonelada de Jet A-1 reemplazado (dependiendo del precio del CO₂), lo que ayuda a compensar el sobrecosto del SAF.
- **Imagen y Demanda del Cliente Corporativo:** Existe una creciente presión de los clientes corporativos para que sus viajes de negocios sean más sostenibles. Las aerolíneas utilizan el SAF como un diferenciador clave para atraer a este segmento de mercado.

4.3. Mercados HUB y Países con Estrategias SAF en la Unión Europea

Dentro de la UE, ciertos países y aeropuertos se están posicionando como líderes, creando centros de demanda muy interesantes debido a la concentración de operaciones que tienen:

- **España:** Aspira a ser un hub de producción de SAF en el sur de Europa, aprovechando su capacidad de producción de materias primas. Empresas como Repsol y Cepsa están invirtiendo en plantas de biocombustibles avanzados. La proximidad de sus aeropuertos hub (Madrid-Barajas, Barcelona-El Prat) a rutas transatlánticas lo convierte en un punto logístico de gran interés.
- **Países Bajos y Francia:** Los aeropuertos de Ámsterdam-Schiphol y París-Charles de Gaulle son de los más grandes de Europa y sedes de aerolíneas líderes (KLM, Air France) con políticas SAF muy proactivas. Tienen una infraestructura logística avanzada para la importación y distribución de combustibles.
- **Alemania:** Fuerte enfoque en e-fuels, con una cuota nacional específica. El hub de Frankfurt es un centro logístico global.
- **Relevancia para el Valle:** Estos países no solo son mercados de destino, sino también potenciales socios tecnológicos y logísticos. La exportación de SAF desde el Valle del Cauca podría dirigirse a los grandes puertos de refinación y distribución como Róterdam, Amberes o los puertos españoles para su posterior mezcla y distribución a los aeropuertos.

4.4. Mecanismos facilitadores

La producción de SAF en el mundo va comenzar siendo muy concentrada, como podría ocurrir en el Valle del Cauca o en otras regiones del país. La demanda es global y los aviones requieren de un abastecimiento permanente. Para poder enfrentar este reto, hay dos mecanismos que pueden facilitar el despegue del mercado, minimizando la huella de carbono.

4.4.1. Book and Claim

Este mecanismo está diseñado para evitar el movimiento innecesario del SAF, aliviando la presión sobre la huella de carbono y los costos. En el Anexo C se brinda más detalle sobre las principales características del mecanismo.

- **Funcionamiento:** Este sistema permite desligar las características de sostenibilidad del combustible físico. Una aerolínea en Europa (o en cualquier parte del mundo) puede comprar los créditos de reducción de emisiones de un lote de SAF producido y consumido en Colombia. Esto evita los costos y las emisiones del transporte del combustible físico.
- **Beneficios:** Permite que la producción de SAF se desarrolle donde es más eficiente y sostenible (cerca de la materia prima en el Valle del Cauca), mientras que la demanda se satisface de forma flexible a nivel global.
- **Requisitos:** Requiere un sistema de registro robusto, transparente y auditado para evitar la doble contabilidad. Iniciativas como las de la RSB y el World Economic Forum están desarrollando estos estándares. La Hoja de Ruta de Colombia contempla su aplicación.

4.4.2. Acuerdos de compra (Offtake Agreements)

Son contratos a largo plazo, entre el productor colombiano y un cliente europeo, que garantizan la venta de un volumen específico de SAF a un precio o fórmula de precios acordados. Son la herramienta más importante para reducir el riesgo de mercado para los productores y facilitar la financiación de nuevas plantas.

4.5. Requisitos de sostenibilidad para el acceso al mercado de la Unión Europea

Para que el SAF del Valle del Cauca pueda ser vendido en la UE y contar para sus mandatos, debe cumplir con un riguroso proceso de verificación de sus características de sostenibilidad.

- **Punto de Partida:** Materias Primas del Anexo IX (RED III). El SAF debe provenir de materias primas listadas como sostenibles en la regulación europea. El RAC de caña de azúcar (bagazo y otros) está incluido como un residuo agrícola, y el etanol producido a partir de estas materias primas calificaría como biocombustible avanzado, dándole una clara vía de acceso. No pasa lo mismo con el alcohol de primera generación a partir de caña de azúcar. Esto es un punto muy importante para tener en consideración. Si bien el SAF de alcohol de caña de azúcar cumple con los requisitos de sostenibilidad de CORSIA, no cuenta para las metas de reducción establecidas en la RED III.
- **Certificación Obligatoria:** La cadena de suministro, desde el campo donde se produce la caña hasta el productor de SAF, debe estar certificada por un esquema reconocido por la Comisión Europea. Algunos de estos corresponden a ISCC EU, RSB EU RED o Bonsucro EU.

- **Análisis de Ciclo de Vida (LCA):** El productor deberá demostrar, a través de un LCA verificado, que cumple con los umbrales de reducción de emisiones de GEI de la UE. Esto no debe suponer un problema para la producción en el Valle, puesto que el sector azucarero ha avanzado en esta medición, especialmente en los ingenios productores de alcohol carburante.
- **Relevancia para el Valle:** El desarrollo de la industria SAF en el Valle del Cauca debe incorporar desde el inicio la trazabilidad y los sistemas de gestión necesarios para obtener estas certificaciones. La experiencia de la industria azucarera en certificaciones tanto de huella de carbono como para exportación se entiende como una ventaja. Es fundamental que la estrategia de acceso a mercados europeos para el cumplimiento de la RED III se base en SAF hecho a partir de alcohol de segunda generación.

5. CONSIDERACIONES CLAVE Y RECOMENDACIONES PARA EL DESARROLLO DE LA CADENA DE VALOR SAF EN EL VALLE DEL CAUCA

El desarrollo exitoso de una cadena de valor de SAF en el Valle del Cauca depende de la materialización de su potencial agroindustrial en un entorno de mercado, tecnológico y regulatorio complejo y en rápida evolución. El análisis de los capítulos anteriores revela que los principales actores, desde el Gobierno Nacional hasta los productores de caña y las aerolíneas, tienen tanto un alto interés en el desarrollo del SAF como una alta influencia para hacerlo realidad.

Esta convergencia de actores con gran capacidad de ejecución e interés crea una oportunidad única, pero también un riesgo significativo de parálisis si los esfuerzos no se coordinan eficazmente. Por lo tanto, la consideración más importante es la necesidad de un liderazgo claro y una gobernanza colaborativa que articule las acciones de todos los stakeholders hacia un objetivo común. Las siguientes recomendaciones se estructuran en torno a este principio, alineándose con la Hoja de Ruta Nacional de SAF de la Aerocivil y las mejores prácticas internacionales.

5.1. Establecer una Gobernanza Regional Efectiva y con Liderazgo

Es fundamental que la región cuente con un esquema de coordinación para facilitar el desarrollo de la producción de SAF.

Para ello se ve como una oportunidad la creación de una “Mesa SAF Valle del Cauca”, que se constituya como una plataforma de colaboración público – privada, con presencia y participación de la academia. Mesas similares se han constituido en Chile y en España y debe posicionarse como el principal articulador de la estrategia regional.

Para la constitución, es necesario convocar a: Gobierno del Valle del Cauca, Asocaña (representando a ingenios y agricultores), INVEST PACIFIC, universidades locales (Univalle, Javeriana Cali, ICESI, etc), Cenicaña, Aeropuerto, representantes de aerolíneas, distribuidores de combustible, empresas de energía y potenciales inversores.

La función de esta mesa es la de servir como el foro para definir planes de acción específicos para la región, monitorear avances, identificar, ayudar a gestionar los cuellos de botella y asegurar que las políticas nacionales se implementen de manera efectiva en el territorio.

5.2. Construir un Marco Regulatorio y de Incentivos

La viabilidad económica es el principal desafío. El marco regulatorio debe propiciar las condiciones para que el producto pueda ser más competitivo.

En ese sentido es necesario desarrollar un paquete de incentivos regionales.

En este punto se vuelve fundamental que la “Mesa SAF Valle del Cauca” colabore con el gobierno nacional (MinHacienda, MinMinas, MinAmbiente, Aerocivil) para apoyar las iniciativas de paquetes de beneficios nacionales y trabajar con los entes territoriales para hacer atractiva la inversión en la región. Esto puede incluir:

- **Incentivos Fiscales:** Créditos fiscales o exenciones tributarias para la inversión en plantas de producción de SAF en el Valle (impuestos locales).
- **Apoyo a la Sostenibilidad:** Incentivos para agricultores de caña que implementen prácticas sostenibles certificadas, mejorando la competitividad del SAF del Valle en mercados de exportación.

Otra manera que desde lo regional se puede apoyar el desarrollo de esta nueva línea productiva es mediante la agilización de permisos y licenciamiento.

Esto se puede lograr mediante la creación de una "ventanilla única" o un equipo de acompañamiento especializado entre el Gobierno Nacional, el Gobierno del Valle y las autoridades ambientales regionales (CVC) para agilizar los procesos de licenciamiento ambiental y permisos de construcción para las nuevas biorrefinerías de SAF, sin sacrificar el rigor ambiental.

5.3. Fortalecer la Cadena de Suministro desde el Origen (Upstream)

La materia prima es fundamental para todo el proceso. Hasta el momento se han hecho algunos trabajos de investigación para el desarrollo de la logística y pretratamiento adecuados para el RAC, sin embargo, esto han sido esfuerzos aislados en su gran mayoría. Es necesario contar con una información abierta y pública para que los interesados puedan tener un punto de referencia y comenzar a implementar los proyectos de recolección y pretratamiento. Por esta razón es muy recomendable realizar estos estudios, o complementar/actualizar los que ya estén hechos y difundirlos entre los interesados para que sirvan de punto de partida.

De otro lado, es necesario garantizar la Sostenibilidad Certificada de la Materia Prima. Para ello es muy recomendable que se pueda impulsar un programa regional para certificar la caña de azúcar bajo los estándares que se requieren. Esto debería ser liderado por la institucionalidad del sector azucarero y se podría contar con el apoyo de algunas de las entidades certificadoras (ISCC, RSB, etc)

5.4. Impulsar la Inversión en Capacidad Productiva (Midstream)

La producción de SAF tiene dentro de los insumos críticos para su producción al hidrógeno y la energía eléctrica. Ambos insumos deben ser verdes para mejorar la huella de carbono y tener mayor capacidad de reducción de emisiones. Se recomienda entonces evaluar el potencial de producción de hidrógeno verde a pequeña y mediana escala en el Valle del Cauca para abastecer a las futuras plantas de SAF, y analizar la disponibilidad de energía renovable para asegurar que toda la cadena tenga una baja huella de carbono.

5.5. Preparar la Infraestructura de Distribución y Uso (Downstream)

Se recomienda que el aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón comience el desarrollo de un plan de adaptación de la infraestructura para la recepción de SAF. Para ello, entre la Aerocivil (actual operador del aeropuerto), en coordinación con los distribuidores de combustible y las aerolíneas, deben realizar el estudio requerido para definir las necesidades de inversión en el Aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón para el almacenamiento, mezcla⁴ y despacho de SAF.

5.6. Desarrollar el Mercado y Asegurar la Demanda

Para asegurar la demanda de la producción, es fundamental contar con compradores definidos; por ello, se recomienda fomentar acuerdos de compra y mecanismos de mercado facilitando, a través de la Mesa SAF Valle del Cauca, el diálogo entre potenciales productores y aerolíneas tanto nacionales como internacionales para explorar la firma de offtake agreements tempranos, así como colaborar con la Aerocivil y el Gobierno Nacional en el diseño e implementación de un sistema robusto de "Book and Claim" que permita comercializar virtualmente el SAF del Valle en mercados internacionales como el europeo. Esto se realiza en plataformas especializadas que actúan como mercados o puntos de transacción, donde confluyen los generadores de los SAFc⁵ y los compradores. Si bien este ecosistema aún está en desarrollo, ya existen algunas de estas plataformas. Las más desarrolladas hasta el momento son:

- **RSB Book & Claim System:**
 - La Roundtable on Sustainable Biomaterials (RSB) es una de las organizaciones de certificación de sostenibilidad más reconocidas y respetadas del mundo, con un fuerte enfoque en el sector de los biocombustibles. Es uno de los esquemas aprobados por CORSIA.
 - Su sistema de Book & Claim es uno de los más avanzados y robustos. Funciona como un registro centralizado donde los productores de SAF certificado por RSB pueden "depositar" los atributos de sostenibilidad de un lote de combustible. Luego, las aerolíneas o clientes corporativos pueden comprar estos atributos (en forma de "créditos de reducción de emisiones de SAF") a través de la plataforma, con la garantía de que cada crédito es único, rastreable y no se cuenta dos veces.
- **SABA (Sustainable Aviation Buyers Alliance) - SAFc Registry**
 - SABA es una alianza liderada por grandes corporaciones (como Microsoft, Boeing, JPMorgan Chase, etc.) y organizaciones ambientales como el RMI (Rocky Mountain Institute) y el Environmental Defense Fund (EDF). Su objetivo es acelerar la producción y el uso de SAF mediante la agregación de la demanda corporativa.

⁴ El proceso de mezcla puede estar ubicado en diferentes puntos de la cadena: En el distribuidor mayorista, en el aeropuerto, o en un lugar intermedio. La definición de la ubicación obedecerá a los análisis que se realicen específicamente para ello.

⁵ Créditos de SAF que consignan los atributos de sostenibilidad exigidos por CORSIA

- Han desarrollado el "SAFc Registry". Un SAFc (Certificado de Combustible de Aviación Sostenible) es la unidad de cuenta para las transacciones de Book & Claim. La plataforma de SABA permite a las empresas comprar estos certificados para cubrir las emisiones de sus viajes de negocios, sabiendo que su inversión está directamente vinculada a la producción y uso de un volumen físico de SAF en alguna parte del mundo.
- Está impulsada directamente por la demanda de los compradores finales (grandes corporaciones principalmente), lo que la hace muy orientada al mercado y alineada con las necesidades de contabilidad de emisiones corporativas.

5.7. Fortalecer el Capital Humano y la Innovación

La industria del futuro necesita talento local, por lo que se recomienda crear programas de formación y especialización mediante alianzas entre el SENA (regional Valle), las universidades locales y la industria regional, con el objetivo de desarrollar perfiles técnicos y profesionales orientados a la operación de biorrefinerías, la logística de biocombustibles y la certificación en sostenibilidad, asegurando así el capital humano necesario para fortalecer esta nueva industria.

6. CONCLUSIONES

El presente documento ha identificado y descrito la cadena de valor para la producción de Combustibles Sostenibles de Aviación (SAF) en el Valle del Cauca, de acuerdo con lo estipulado en los Términos de Referencia del proyecto. El análisis confirma que la región posee una oportunidad tangible y estratégica para posicionarse como un hub de producción de SAF en Colombia y un actor relevante en el mercado internacional, gracias a su robusta industria azucarera, que provee una doble vía de materias primas: biomasa (RAC) y bioetanol.

Del análisis se desprenden las siguientes conclusiones clave:

- **Potencial de Materia Prima Sólido pero Condicionado:** El Valle del Cauca cuenta con una de las bases de materia prima más consolidadas y de mayor potencial del país. Sin embargo, su aprovechamiento para SAF no es automático; depende de la implementación de una logística de recolección eficiente para el RAC y de la competitividad del bioetanol frente a otros usos. La sostenibilidad no se constituye como un atributo opcional, sino que corresponde a un requisito indispensable para la viabilidad del negocio, especialmente para la exportación.
- **Mercado de Demanda Real y Exigente:** La Unión Europea se presenta como el principal foco de demanda a corto y mediano plazo. Esta demanda está garantizada por un marco regulatorio robusto (ReFuelEU Aviation), pero el acceso a este mercado está intrínsecamente ligado al cumplimiento de sus estrictos criterios de sostenibilidad (Directiva de Energías Renovables - RED III). El éxito de la exportación dependerá de la capacidad de los productores del Valle para producir alcohol que pueda certificar su cadena de suministro bajo estándares como ISCC EU o RSB.
- **Cadena de Valor Completa pero con Necesidades Clave:** Todos los eslabones de la cadena de valor, desde el upstream hasta el downstream, son técnicamente factibles en la región. Adicionalmente, dentro de cada grupo de actores, hay más de una empresa que podría participar de la cadena productiva e incluso una misma empresa podría desarrollar dos o más eslabones de la cadena. No obstante, cada uno presenta necesidades críticas de inversión y desarrollo: infraestructura logística para biomasa, inversión en biorrefinerías (ATJ, lignocelulosa y/o FT), adaptación de terminales de almacenamiento y mezcla, y adecuación de la infraestructura aeroportuaria en el Aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón.
- **Ecosistema de Actores Estratégico y Desafiante:** La conclusión más importante del análisis de stakeholders es la alta convergencia de interés e influencia en la mayoría de los actores clave. Esto representa el mayor activo del proyecto, ya que existe una voluntad compartida para avanzar. Sin embargo, también constituye el principal desafío: el éxito del desarrollo del SAF en el Valle del Cauca será, fundamentalmente, un ejercicio de liderazgo y

gobernanza efectiva. Sin una coordinación clara que alinee los esfuerzos del sector público, privado y académico, este potencial podría fragmentarse o estancarse.

En definitiva, la viabilidad de una planta de SAF en el Valle del Cauca trasciende el análisis técnico y de recursos. Es un proyecto de construcción de un nuevo ecosistema industrial sostenible. El camino por seguir, delineado en la Hoja de Ruta Nacional y enriquecido con las mejores prácticas internacionales, es claro. El éxito dependerá de la capacidad de los actores del Valle del Cauca para colaborar, innovar y ejecutar esta visión de manera coordinada, transformando su ventaja agroindustrial en una ventaja competitiva en el mercado global de la energía limpia.

7. BIBLIOGRAFÍA

Documentos Fundamentales (Colombia)

- **Aeronáutica Civil de Colombia.** (Enero 2025). Cielos Limplos, Economía y Aviación para la vida: Hoja de Ruta de los Combustibles Sostenibles de Aviación en Colombia. Bogotá D.C., Colombia.
- **Aeronáutica Civil de Colombia.** (Enero 2025). ESTUDIO E INFORME DEL IMPACTO ASOCIADO A LA CADENA DE SUMINISTRO DE COMBUSTIBLE PARA LA AVIACIÓN CIVIL, CON ÉNFASIS EN LA INTEGRACIÓN DE LOS "SUSTAINABLE AVIATION FUEL" -SAF-. Bogotá D.C., Colombia.

Documentos Internacionales y Regionales (Hojas de Ruta y Políticas SAF)

- **Australia - CSIRO & Boeing.** (2023). Sustainable Aviation Fuel Roadmap. Canberra, Australia.
- **Brasil - Boeing, Embraer, FAPESP, UNICAMP.** (Junio 2013). Flightpath to Aviation Biofuels in Brazil: Action Plan.
- **Canadá - Canadian Council for Sustainable Aviation Fuels (C-SAF).** (2023). The C-SAF Roadmap: Building a feedstocks-to-fuels SAF supply chain in Canada. Canadá.
- **Chile - Ministerio de Energía, Junta de Aeronáutica Civil, Agencia de Sostenibilidad Energética.** (Abril 2024). HOJA DE RUTA SAF 2050: Combustibles de Aviación Sostenibles. Santiago, Chile.
- **España - PwC, Iberia, Iberia Express, Vueling, Cepsa, Biocirc.** (Septiembre 2024). Cómo hacer de España el líder europeo de SAF. España.
- **Estados Unidos - U.S. Department of Energy (DOE), et al.** (Septiembre 2022). SAF Grand Challenge Roadmap: Flight Plan for Sustainable Aviation Fuel. Washington D.C., USA.
- **Italia - Ente Nazionale per l'Aviazione Civile (ENAC).** (Mayo 2024). A ROADMAP FOR SUSTAINABLE AVIATION FUELS IN ITALY: Enac path for the definition of SAF policy. Roma, Italia.
- **Unión Europea - ICF.** (Enero 2025). European SAF Industrial Policy: Ensuring the competitiveness of European aviation, energy, and connectivity.

Normativas y Estándares Clave

- **ASTM International.** ASTM D7566: Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons.
- **ASTM International.** ASTM D1655: Standard Specification for Aviation Turbine Fuels.
- **International Air Transport Association (IATA).** Documentación y manuales sobre SAF y Operaciones de Combustible.

- **International Civil Aviation Organization (ICAO).** Documentación relacionada con el Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA), Anexo 16, Volumen IV.
- **Unión Europea.** Reglamento (UE) 2023/2405 (ReFuelEU Aviation).
- **Unión Europea.** Directiva (UE) 2018/2001 (RED II) y sus modificaciones posteriores (RED III).
- **EMBER Climate.** (Publicación continua). “The price of emissions allowances in Europe”, Consultado el 13 de agosto 2025.

ANEXO A: RESUMEN DEL REGLAMENTO REFUEL EU AVIATION Y SU RELEVANCIA PARA EL PROYECTO

1. Objetivo Principal del Reglamento

ReFuelEU Aviation es un reglamento de la Unión Europea que forma parte del paquete "Fit for 55". Su objetivo principal es crear un mercado para los SAF y estimular tanto su producción como su demanda en toda la UE de manera uniforme. Lo hace estableciendo obligaciones claras y crecientes para los proveedores de combustible y las aerolíneas, creando así una demanda de mercado predecible y garantizada.

2. Elementos Clave de ReFuelEU Aviation

Mandatos de Mezcla Obligatorios: Es el corazón del reglamento. Obliga a los proveedores de combustible a suministrar un porcentaje mínimo de SAF en los principales aeropuertos de la UE ("Aeropuertos de la Unión"). Las cuotas son progresivas:

- **2025:** 2% del total de combustible suministrado debe ser SAF.
- **2030:** 6% de SAF.
- **2035:** 20% de SAF.
- **2050:** 70% de SAF.

Sub-mandato para Combustibles Sintéticos (e-fuels): Para impulsar tecnologías más avanzadas y escalables, el reglamento incluye una cuota específica para e-fuels (producidos con hidrógeno renovable y CO₂ capturado).

- **2030:** 1.2% del total de combustible debe ser sintético.
- **2050:** Esta cuota asciende al 35%.

Medida "Anti-Tankering": Para evitar que las aerolíneas eludan el mandato cargando combustible convencional más barato fuera de la UE, se les obliga a cargar al menos el 90% del combustible necesario para sus vuelos en los aeropuertos europeos. Esto asegura que la demanda de SAF se materialice efectivamente dentro de la UE.

3. Relevancia para el proyecto (ATCP 90)

Este reglamento no solo afecta al mercado, sino que impacta directamente en la viabilidad de todo el proyecto en el Valle del Cauca.

- **Para la Viabilidad de Materias Primas (Producto 1):** El mandato crea una demanda a largo plazo que justifica la inversión en la movilización y pretratamiento de nuevas materias primas como el RAC de la caña. Además, el sub-mandato de e-fuels crea una competencia a futuro por insumos como el hidrógeno renovable, lo que debe ser considerado en la estrategia de producción.

- **Para la Viabilidad Tecnológica (Producto 2):** Al crear un mercado, ReFuelEU incentiva la inversión y el escalamiento de tecnologías de conversión como ATJ (desde etanol y desde alcohol celulósico) y FT (desde biomasa), haciéndolas más atractivas para inversores y tecnólogos.
- **Para el Mercado y la Cadena de Valor (Producto 3):** Este es el impacto más directo. ReFuelEU crea el mercado de exportación para el SAF producido en el Valle del Cauca. Un productor colombiano puede vender su SAF a un proveedor de combustible en Europa, ayudándole a este último a cumplir con su cuota obligatoria.
- **Para la Viabilidad Financiera (Producto 4):** La existencia de mandatos obligatorios y predecibles reduce drásticamente el riesgo de mercado. Esto es fundamental para los inversores, ya que permite la firma de acuerdos de compra a largo plazo (oftakes), que a su vez son la principal herramienta para asegurar la financiación de las plantas de producción. Un proyecto puede conseguir financiación bancaria en gran medida gracias a esta certidumbre de demanda.
- **Para Barreras y Oportunidades (Producto 5):** ReFuelEU representa la mayor oportunidad de mercado para el proyecto. A su vez, presenta barreras logísticas y de competencia, ya que productores de todo el mundo intentarán abastecer este mismo mercado.

ANEXO B: RESUMEN DE LA DIRECTIVA DE ENERGÍAS RENOVABLES (RED III) Y SU RELEVANCIA PARA EL PROYECTO

1. Objetivo Principal de la Directiva

La Directiva de Energías Renovables (actualmente en su tercera versión, RED III) es la piedra angular de la política de sostenibilidad de la UE. Su objetivo es establecer los criterios que debe cumplir un combustible para ser considerado "sostenible" y "renovable". Actúa como el "pasaporte" o la "licencia para operar": si un SAF no cumple con la RED III, no puede ser contabilizado para los mandatos de ReFuelEU Aviation ni recibir los beneficios del Sistema de Comercio de Emisiones (EU ETS).

2. Elementos Clave de la RED III (Relevantes para SAF)

Criterios de Sostenibilidad del Suelo: Prohíbe explícitamente el uso de materias primas cultivadas en tierras con altas reservas de carbono (bosques primarios, humedales, turberas) o alta biodiversidad. Esto es crucial para cualquier materia prima agrícola.

Umbrales de Reducción de Emisiones de GEI: Establece los ahorros mínimos de Gases de Efecto Invernadero (GEI) que debe lograr un biocombustible en su ciclo de vida completo (LCA) en comparación con su equivalente fósil. Para nuevas instalaciones, este umbral es del 70%.

Materias Primas Elegibles (Anexo IX): Este anexo es fundamental. Lista las materias primas que la UE considera avanzadas y sostenibles, y cuyo uso se fomenta por encima de otras.

Anexo IX, Parte A (Más favorecidas): Incluye residuos agrícolas como el bagazo y el RAC (paja) de la caña de azúcar, y biocombustibles producidos a partir de estos (como el etanol celulósico). Esto es una validación directa y muy positiva para el potencial del Valle del Cauca.

Anexo IX, Parte B: Incluye materias primas como los aceites de cocina usados (UCO) y grasas animales. Tienen un límite de contribución a los objetivos, lo que significa que la UE busca no depender exclusivamente de ellos.

Certificación Obligatoria: Exige que toda la cadena de suministro, desde el agricultor hasta el productor de combustible, sea auditada y certificada por un Esquema Voluntario reconocido por la Comisión Europea (como ISCC EU, RSB EU RED, o Bonsucro EU para la caña de azúcar).

3. Relevancia para el proyecto (ATCP 90)

La RED III es el marco técnico y de sostenibilidad que define la viabilidad misma de un proyecto de exportación a la UE.

- Para la Viabilidad de Materias Primas (Producto 1):** La directiva define qué materias primas del Valle del Cauca son viables para la exportación a la UE.

La inclusión del RAC en el Anexo IX-A es una oportunidad estratégica. También establece los requisitos de cultivo sostenible que los productores de caña deben cumplir.

- **Para la Viabilidad Tecnológica (Producto 2):** El umbral de reducción de GEI del 70% establece una meta de rendimiento clara para los procesos de conversión (ATJ, FT). La tecnología debe ser lo suficientemente eficiente para alcanzar este ahorro en el ciclo de vida.
- **Para el Mercado y la Cadena de Valor (Producto 3):** La certificación bajo RED III es el requisito de entrada al mercado de la UE. La cadena de valor debe diseñarse desde el principio para garantizar la trazabilidad y la integridad de los datos, desde el campo de caña hasta la entrega del SAF, para poder pasar las auditorías.
- **Para la Viabilidad Financiera (Producto 4):** Los costos de certificación, implementación de prácticas agrícolas sostenibles, y monitoreo y reporte (MVR) deben ser incluidos en el modelo financiero del proyecto. Aunque es un costo, es la inversión que habilita el acceso al mercado premium europeo.
- **Para Barreras y Oportunidades (Producto 5):** Cumplir con la RED III es una barrera técnica y administrativa significativa. Sin embargo, lograr una certificación robusta con una baja huella de carbono para el SAF del Valle del Cauca (aprovechando la eficiencia de la industria azucarera) representa una oportunidad competitiva fundamental, posicionando al producto como de alta calidad y confianza en el mercado global.

ANEXO C: MECANISMO DE REGISTRO Y RECLAMO (BOOK AND CLAIM) PARA SAF

1. Resumen General del Mecanismo

El sistema de "Registro y Reclamo" (Book and Claim) es un mecanismo de cadena de custodia diseñado para superar las barreras geográficas y logísticas en el suministro de SAF. Su función principal es **desacoplar los atributos de sostenibilidad de un lote de SAF de su flujo físico**.

Para ilustrar la bondad del mecanismo se considera el siguiente **ejemplo teórico**: Un productor en el Valle del Cauca produce SAF sostenible, pero una aerolínea en Frankfurt, Alemania, es la que necesita cumplir con una obligación de descarbonización. Transportar físicamente ese SAF desde Colombia a Alemania sería logísticamente complejo, costoso y generaría emisiones adicionales, anulando parte del beneficio ambiental.

La Solución "Book and Claim":

- a) **Producción y Verificación:** El productor en el Valle del Cauca produce un lote de SAF y lo hace verificar por un tercero independiente. Esta verificación confirma el volumen y sus características de sostenibilidad (ej. reducción de GEI del 80% según criterios CORSIA/RED III).
- b) **Entrega Local:** El SAF físico se entrega y consume localmente (ej. en el Aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón), reemplazando una cantidad equivalente de combustible fósil.
- c) **Registro ("Book"):** Los atributos de sostenibilidad verificados (el "crédito verde") se registran como un activo digital en un registro transparente y auditado. El productor ahora puede vender este "Certificado de SAF".
- d) **Compra y Reclamo ("Claim"):** La aerolínea en Frankfurt compra ese certificado digital. Al hacerlo, adquiere el derecho legal a reclamar los beneficios de reducción de emisiones de ese lote de SAF en su propio informe de sostenibilidad (para CORSIA, EU ETS, o metas corporativas), aunque el combustible que utilizó físicamente en su vuelo fuera convencional.

Este sistema asegura que el beneficio ambiental total se mantiene (una unidad de SAF reemplazó a una unidad de combustible fósil en el sistema global), pero permite que la inversión fluya hacia donde la producción es más eficiente y sostenible, y que los beneficios se asignen donde son más necesarios.

2. Grado de Desarrollo del Mecanismo

El sistema "Book and Claim" no es solo una teoría; se encuentra en una fase de desarrollo avanzado y de implementación piloto a nivel global.

- **Liderazgo:** Organizaciones como la Mesa Redonda sobre Biomateriales Sostenibles (RSB), el Foro Económico Mundial (a través de la iniciativa "Clean Skies for Tomorrow") y la IATA están liderando el desarrollo de los estándares y las plataformas de registro.
- **Plataformas Existentes:** Ya existen registros y plataformas en operación o en fases piloto avanzadas que facilitan estas transacciones. La RSB, por ejemplo, tiene un registro funcional.
- **Aceptación Regulatoria:** CORSIA, bajo el marco de la OACI, está evaluando y definiendo las reglas para que los sistemas Book and Claim sean aceptados como un medio válido para que las aerolíneas cumplan con sus obligaciones de reducción de emisiones. La clave para la aceptación regulatoria es garantizar la robustez, transparencia y prevención de la doble contabilidad a través de registros auditados. Se espera que en los próximos años se consoliden los estándares globales.
- **Uso Corporativo:** Muchas empresas ya utilizan este mecanismo para reducir las emisiones de Alcance 3 de sus viajes de negocios, comprando SAF a través de programas de aerolíneas.

En conclusión, el mecanismo está lo suficientemente maduro como para que un nuevo productor en el Valle del Cauca pueda planificar su modelo de negocio en torno a él, con la expectativa de que su aceptación formal y estandarización global se completará en el corto plazo.