

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: 29 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

PRODUCTO 5: CONCLUSIONES, BARRERAS, OPORTUNIDADES Y RECOMENDACIONES	4
1. INTRODUCCIÓN.....	4
1.1. Propósito y Estructura del Documento	4
1.2. Alcance de la Consultoría y del Análisis Financiero	4
2. CONCLUSIONES CONSOLIDADAS DEL ANÁLISIS DE VIABILIDAD	6
2.1. Conclusiones Individuales Clave.....	6
2.2. Conclusiones Cruzadas: La Sinergia del Análisis	8
2.3. Alineación Estratégica con la Hoja de Ruta de Colombia	9
3. BARRERAS Y OPORTUNIDADES EN EL CONTEXTO NACIONAL	10
3.1. Barreras Identificadas	10
Técnicas y Logísticas:	10
Económicas y Financieras:.....	10
Regulatorias y de Políticas Públicas:.....	11
De Mercado y Sostenibilidad:.....	11
3.2. Oportunidades Identificadas.....	11
Técnicas y Logísticas:	11
Económicas y Financieras:.....	12
Regulatorias y de Políticas Públicas:.....	12
De Mercado y Sostenibilidad:.....	12
3.3. Contraste con la Hoja de Ruta de Colombia	13
4. RECOMENDACIONES ESTRATÉGICAS Y MEJORES PRÁCTICAS INTERNACIONALES	14
4.1. Lecciones Clave del Contexto Internacional	14
Lección 1: La Política Pública es el Motor, no el Acompañante.	14
Lección 2: La Colaboración Estructurada es Indispensable.	14
Lección 3: La Batalla se Gana en la Logística de la Biomasa Residual.	15
Lección 4: La Sostenibilidad Certificada es el Pasaporte al Mercado Global. ...	16
Lección 5: Se Necesita un Portafolio Tecnológico Evolutivo.	16
4.2. Recomendaciones Finales para el Valle del Cauca	16
Eje 1: Gobernanza y Articulación (Acción Inmediata).....	16
Eje 2: Política Pública e Incentivos (Cabildeo Estratégico)	16
Eje 3: Desarrollo de la Cadena de Suministro (Proyectos Prioritarios).....	17

Eje 4: Impulso a la Inversión y Tecnología (Atracción y Desarrollo).....	18
Eje 5: Desarrollo de Mercado y Sostenibilidad (Creación de Demanda)	18
5. BIBLIOGRAFÍA.....	19

PRODUCTO 5: CONCLUSIONES, BARRERAS, OPORTUNIDADES Y RECOMENDACIONES

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Propósito y Estructura del Documento

El presente informe constituye el quinto producto de la Asistencia Técnica de Corto Plazo (ATCP) 90, diseñado para entregar a Invest Pacific y a los stakeholders del Valle del Cauca una visión consolidada y estratégica sobre la viabilidad de implementar una planta de producción de Combustible Sostenible de Aviación (SAF).

Este documento no es un simple resumen, sino una síntesis analítica que integra y cruza los hallazgos de los cuatro productos previos. Su propósito es conectar los puntos entre la disponibilidad de materias primas, la selección tecnológica, la configuración de la cadena de valor y la viabilidad financiera, contrastando estas conclusiones con el marco estratégico definido por la Hoja de Ruta de los Combustibles Sostenibles de Aviación en Colombia y las mejores prácticas observadas a nivel internacional.

El informe está estructurado de la siguiente manera:

1. **Conclusiones Consolidadas:** Un recuento de los hallazgos clave de los productos 1 al 4, realizando un análisis cruzado para demostrar la interdependencia entre las diferentes áreas de estudio y su alineación con la estrategia nacional.
2. **Barreras y Oportunidades:** Una recopilación y categorización de los principales desafíos y ventajas identificados a lo largo de la consultoría, contextualizados dentro de las prioridades de la Hoja de Ruta de Colombia.
3. **Recomendaciones Estratégicas:** Un plan de acción final que no solo consolida las recomendaciones previas, sino que las enriquece con un análisis de mejores prácticas internacionales, ofreciendo una hoja de ruta pragmática y competitiva para hacer del proyecto SAF en el Valle del Cauca una realidad.

1.2. Alcance de la Consultoría y del Análisis Financiero

La consultoría ha tenido como objetivo general determinar la viabilidad de una planta de SAF en el Valle del Cauca a través de un análisis multifacético:

- **Producto 1:** Evaluó la disponibilidad y competitividad de materias primas clave (etanol y biomasa lignocelulósica).

- **Producto 2:** Analizó y comparó las rutas tecnológicas más prometedoras (ATJ y G-FT) para el contexto regional.
- **Producto 3:** Mapeó la cadena de valor potencial, identificó los stakeholders clave y analizó el principal mercado de exportación (UE).
- **Producto 4:** Proporcionó un análisis de inversiones y retornos estimados. Es crucial entender el alcance de este último: corresponde a una estimación de prefactibilidad Clase 5, según la norma ASTM E2516-11. Esto significa que es un análisis de orden de magnitud basado en información pública, datos de estudios de referencia y factores de costo de la industria. Su objetivo no es proporcionar una cifra de inversión definitiva, sino evaluar la viabilidad económica bajo diferentes escenarios, identificar las variables más sensibles (precios de insumos, CAPEX, precio de venta) y determinar las condiciones de contorno (incentivos, precios) necesarias para que el proyecto sea financieramente viable. Este análisis es la herramienta que permite traducir los hallazgos técnicos en implicaciones de negocio y de política pública.

2. CONCLUSIONES CONSOLIDADAS DEL ANÁLISIS DE VIABILIDAD

El análisis integral permite extraer conclusiones robustas, tanto de áreas específicas como de la interconexión entre ellas.

2.1. Conclusiones Individuales Clave

Estas conclusiones surgen del análisis de cada producto y representan pilares fundamentales para entender el proyecto.

- **Liderazgo y Gobernanza como Factor Crítico de Éxito:** El análisis de stakeholders (Producto 3) reveló que el ecosistema del Valle del Cauca cuenta con múltiples actores (ingenios, gremios, gobierno, academia, entre otros) con un alto grado de interés e influencia en el proyecto. Esta convergencia es una fortaleza inmensa, pero también constituye el principal desafío de gobernanza. Sin un liderazgo claro y una plataforma de articulación efectiva que alinee estos intereses diversos, existe un riesgo significativo de parálisis. El éxito del proyecto dependerá fundamentalmente de la capacidad de construir una visión compartida y un plan de acción coordinado.
- **Un Ecosistema Resiliente con Múltiples Actores:** Una conclusión importante es que, dentro de cada eslabón de la cadena de valor, no existe una dependencia de un único actor. Hay múltiples ingenios productores de etanol, numerosos cultivadores de caña, diversas entidades académicas y varias empresas de logística. Esta multiplicidad crea un ecosistema competitivo y resiliente. Si una empresa no está interesada en participar, existen otras que pueden tomar su lugar, lo que reduce el riesgo del proyecto y aumenta las posibilidades de encontrar los socios adecuados para viabilizarlo.
- **La Certificación de Sostenibilidad como Requisito Fundamental:** El acceso a los mercados de exportación más atractivos (UE) y el cumplimiento de los estándares de la industria de la aviación (CORSIA) dependen de una certificación de sostenibilidad rigurosa. Por lo tanto, la implementación de un esquema de certificación alineado con los mencionados estándares no es un aspecto técnico secundario, sino una condición de negocio habilitante y fundamental. Sin ella, el producto no tendría acceso a su mercado principal. Algunas certificaciones que cumplen con estos requisitos son:
 - **ISCC EU:** Es un estándar que ha sido diseñado para asegurar el cumplimiento de los principios de sostenibilidad de los biocombustibles en la Unión Europea. Dentro de las verificaciones que se realizan se incluyen criterios ambientales y sociales, los cuales deben ser trazables y acreditar que no hay deforestación, protección a la biodiversidad y a los derechos humanos. Se debe realizar un balance de masas y

acreditar la reducción de emisiones de gases efecto invernadero (GEI). Para ello, como en cualquier certificación, se realizan auditorías independientes y verificación de la cadena de custodia. Acreditado el cumplimiento se pueden emitir declaraciones de sostenibilidad autorizadas.

- **RSB (Roundtable on Sustainable Biomaterials):** Es una certificación cuyo objetivo es garantizar la producción sostenible de bioproductos, biomateriales y biocombustibles. Está estructurada sobre un enfoque integral que abarca 12 principios en 3 dimensiones:
 - Ambientales: uso del suelo, agua, aire, emisiones de GEI.
 - Sociales: derechos humanos y laborales, desarrollo rural y social.
 - Gobernanza: legalidad, transparencia en la cadena de custodia.
- **El Mecanismo "Book and Claim" como Acelerador de Mercado:** La logística física del SAF es compleja y costosa. El análisis de mercados (Producto 3) concluye que el mecanismo "Book and Claim" es una herramienta indispensable. Permite desacoplar la molécula física de su atributo de sostenibilidad, creando un mercado virtual que facilita las transacciones, genera una demanda temprana y reduce la dependencia de complejas cadenas logísticas, acelerando la viabilidad financiera de los primeros proyectos. Actualmente existen los estándares, los certificadores, los auditores y los operadores de registro, que viabilizan la realización del proceso.
- **La Urgencia de la Transición a Materias Primas de Segunda Generación:** La regulación de la Unión Europea (RED III) establece limitaciones claras sobre el uso de biocombustibles producidos a partir de cultivos que compiten con alimentos (etanol 1G). Aunque el etanol de caña tiene un mejor desempeño que otros, esta tendencia regulatoria representa una barrera comercial a mediano y largo plazo. Esto crea una urgencia estratégica para que el Valle del Cauca acelere el desarrollo de la cadena de valor del RAC para producir etanol de segunda generación (2G), asegurando así la sostenibilidad y competitividad a largo plazo de su industria de SAF.
- **Hidrógeno Verde y Energía Eléctrica como Insumos Críticos y Oportunidad de Sinergia:** El análisis tecnológico y financiero (Productos 2 y 4) demuestra que la viabilidad de las rutas de producción de SAF más prometedoras, como la ATJ, depende críticamente del acceso a insumos energéticos competitivos. En este sentido, la cogeneración de los ingenios azucareros surge como una oportunidad estratégica fundamental. La planta de SAF podría abastecerse de energía eléctrica renovable generada a partir de biomasa (bagazo), y esta misma energía podría ser utilizada para producir hidrógeno verde in-situ mediante electrólisis. Esta sinergia no solo resuelve el problema del suministro externo, sino que reduce la dependencia de la red eléctrica y crea un modelo de economía circular. Sin embargo, también subraya que la disponibilidad y el costo de estos dos vectores energéticos no son factores secundarios, sino condiciones habilitantes que deben ser co-

desarrolladas con el proyecto SAF, integrando su planificación desde las fases iniciales.

2.2. Conclusiones Cruzadas: La Sinergia del Análisis

Estas conclusiones emergen al conectar los hallazgos de los diferentes productos.

- **El Eje Materia Prima – Tecnología (Análisis P1 x P2):** El Producto 1 identificó la doble ventaja del Valle: etanol 1G disponible hoy y un enorme potencial de RAC para el futuro. El Producto 2 identificó la tecnología ATJ como ideal para el etanol.
 - **Conclusión Cruzada:** La estrategia óptima y de menor riesgo es una "doble vía" evolutiva. Iniciar con una planta ATJ alimentada por etanol 1G para una entrada rápida al mercado. En paralelo, desarrollar la logística del RAC para, en una segunda fase, integrar la producción de etanol 2G que alimentaría la misma planta ATJ. Esta sinergia maximiza el uso de la inversión inicial y mitiga los riesgos de ambas materias primas.

- **El Eje Cadena de Valor – Viabilidad Económica (Análisis P3 x P4):** El Producto 3 identificó la necesidad de un marco de incentivos y de asegurar la demanda. El Producto 4 cuantificó que, sin estos, el proyecto no es rentable a precios de mercado actuales.
 - **Conclusión Cruzada:** La viabilidad financiera del proyecto no depende de la optimización técnica, sino de la intervención en el mercado y la política pública. Los hallazgos son claros:
 - **La Sensibilidad al Precio del Etanol es Crítica:** El modelo financiero del Producto 4 demuestra que el precio de compra del etanol es la variable más sensible. Esto significa que cualquier mecanismo que reduzca este costo (sea por la entrada de un etanol 2G más económico o por incentivos que compensen el costo de oportunidad) tiene un impacto directo y masivo en la viabilidad del proyecto.
 - **El CAPEX es una Barrera de Entrada:** La alta inversión inicial, modelada en el Producto 4, requiere mecanismos mitigación del riesgo para atraer capital, como los identificados en el análisis de stakeholders del Producto 3 (contratos a largo plazo, garantías públicas, incentivos fiscales a la inversión). Es importante señalar que la tecnología ATJ se constituye como una alternativa emergente en el mercado tecnológico. Los desarrolladores tecnológicos internacionales están muy interesados en escalar

sus procesos, razón por la cual se pueden crear alianzas tipo “joint venture” para diversificar el riesgo de instalar plantas pioneras.

2.3. Alineación Estratégica con la Hoja de Ruta de Colombia

Las conclusiones de la consultoría validan y detallan las directrices de la Hoja de Ruta de los Combustibles Sostenibles de Aviación en Colombia.

- **Validación de Pilares y Ejes:** La estrategia de "doble vía", el enfoque en la economía circular del RAC y la necesidad de un marco de incentivos competitivo se alinean perfectamente con los tres pilares (Descarbonización, Industria Productiva, Inclusión Social) y los cinco ejes de actuación de la Hoja de Ruta nacional.
- **Aporte de la Consultoría:** Este trabajo funciona como un "caso de estudio" regional para la Hoja de Ruta nacional. Proporciona el análisis técnico-económico detallado que justifica la implementación de sus ejes de actuación en el Valle del Cauca y cuantifica el impacto de no hacerlo. Demuestra, con cifras, que el potencial del Valle del Cauca es fundamental para que Colombia pueda cumplir sus aspiraciones de producción de 100 millones de galones para 2035.

3. BARRERAS Y OPORTUNIDADES EN EL CONTEXTO NACIONAL

La compilación de los análisis permite consolidar una visión clara de los principales desafíos y ventajas que enfrenta el proyecto SAF en el Valle del Cauca.

3.1. Barreras Identificadas

Técnicas y Logísticas:

- **Cadena de Suministro del RAC (P1, P3):** Ausencia de una logística establecida para la recolección, densificación y transporte eficiente del RAC desde el campo. Es la principal barrera técnica del UPSTREAM.
- **Disponibilidad de Hidrógeno Verde (P2, P4):** La tecnología ATJ requiere hidrógeno. La falta de una oferta de H₂ verde a costo competitivo en la región obligaría a la autogeneración, incrementando el CAPEX del proyecto.
- **Infraestructura de Mezcla y Distribución (P3):** Necesidad de construir la infraestructura para realizar la mezcla (independientemente del lugar donde se vaya a realizar, hoy no existe) y de realizar adecuaciones en los aeropuertos para el manejo del SAF.

Económicas y Financieras:

- **Mayor Costo de Producción ("Prima Verde") (P4):** El SAF es estructuralmente más caro que el combustible convencional. El análisis financiero demostró la necesidad de precios de venta significativamente más altos o de incentivos para cerrar esta brecha. De acuerdo con los resultados obtenidos en el Producto 4, el precio del combustible JET A1 es cercano a los US\$ 2/gal, mientras que el precio de venta del SAF producido en el Valle oscila entre los US\$ 5/gal y los US\$ 7,35 /gal¹.
- **Costo de Oportunidad de Materias Primas (P1, P4):** El etanol 1G y el bagazo ya tienen mercados que definen su costo. Este es el caso del mercado de alcohol carburante, el cual tiene un precio definido por el Ministerio de Minas y Energía, y estuvo fijado en US\$ 3,88 en 2024 y US\$ 3,80 en 2025² por galón. Una situación similar ocurre con el bagazo, el cual ya está siendo utilizado para la generación eléctrica en las plantas de cogeneración y una parte se vende a la producción de papel. El precio estimado de la venta para papel es cercano a los US\$ 35 /ton. El SAF debe poder competir con el ingreso que estos productos ya generan.

¹ Escenario SAF 2G y Escenario BAU, respectivamente. (Ver Tabla 10, Producto 4).

² Periodo comprendido entre enero y mayo.

- **Acceso a Capital (P3, P4):** La alta inversión inicial y los riesgos de mercado y tecnológicos de los proyectos pioneros hacen más retante la consecución de la financiación.

Regulatorias y de Políticas Públicas:

- **Ausencia de un Paquete de Incentivos Competitivo (P3, P4):** Esta es la barrera más crítica a nivel nacional. La falta de incentivos fiscales y a la producción pone a Colombia en desventaja frente a otros países, como por ejemplo EE.UU.
- **Incertidumbre Regulatoria (P3):** La falta de una política de Estado a largo plazo, con metas claras y mecanismos definidos, genera incertidumbre. Es necesario seguir el proceso de implementación de la Hoja de Ruta nacional para generar mayor confianza a los inversionistas.

De Mercado y Sostenibilidad:

- **Limitaciones en el Mercado de Exportación para Etanol 1G (P1, P3):** La regulación europea (RED III) impone restricciones al uso de biocombustibles de primera generación. Esta es una barrera comercial directa y creciente que obliga a acelerar la transición hacia el uso de residuos como el RAC (etanol 2G).
- **Complejidad y Costo de la Certificación (P1, P3):** El requisito de certificar toda la cadena de suministro bajo estándares internacionales (CORSIA/ISCC) es un proceso complejo y costoso, especialmente para los productores agrícolas.

3.2. Oportunidades Identificadas

Técnicas y Logísticas:

- **Industria Consolidada y Sinergias (P1, P2, P3):** La agroindustria de la caña de azúcar ofrece una plataforma de lanzamiento inmejorable: infraestructura, logística para etanol y bagazo, conocimiento técnico y la posibilidad de integrar la planta de SAF a un ingenio para compartir servicios y reducir costos. Es posible integrar las labores de recolección de RAC con la cosecha tradicional y desarrollar nuevas tecnologías para facilitar este proceso, lo cual redundaría en menores costos de transporte y pretratamientos. De igual manera, la disponibilidad de energía eléctrica a costo de venta al mercado mayorista es una ventaja que solamente se podría superar con inversiones adicionales para la autogeneración.

Económicas y Financieras:

- **Abundancia de Materia Prima Residual (P1):** El RAC es un residuo de bajo costo en campo. Una logística eficiente lo convertiría en una materia prima viable, una oportunidad económica latente.
- **Atracción de Financiación Climática (P3):** El proyecto es un candidato ideal para atraer "inversión verde" de fondos de impacto y bancos de desarrollo. Se recomienda explorar en detalle las diferentes alternativas que tienen estos fondos y bancos. Los principales corresponden a los que funcionan bajo el marco de Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Entre estos fondos están el Fondo Verde para el Clima (GCF), el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF) y los Fondos de Inversión Climática (CIF). Del lado de los bancos de desarrollo se encuentran el Banco Mundial y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), los cuales tienen líneas de préstamos, subvenciones y asistencia técnica para proyectos climáticos.

Regulatorias y de Políticas Públicas:

- **Marco de la Hoja de Ruta Nacional (P3):** La existencia de un documento de política pública que prioriza el SAF crea un entorno favorable y una señal positiva para inversores y agencias gubernamentales. Es necesario continuar apoyando el proceso de las mesas del ecosistema SAF para que se cumplan los objetivos trazados en la hoja de ruta.
- **Experiencia Regulatoria Previa (P3):** Colombia tiene más de dos décadas de experiencia regulando biocombustibles, lo que puede acelerar el desarrollo del marco para el SAF y construirlo de una manera más asertiva.

De Mercado y Sostenibilidad:

- **Acceso a Mercados con Demanda Garantizada (P3):** Los mandatos de la UE (ReFuelEU) crean un mercado de exportación predecible y en crecimiento para los productores colombianos que logren la certificación.
- **Potencial de Liderazgo Regional (P3):** El Valle del Cauca tiene la escala y la integración para ser un hub pionero de producción de SAF en la región.
- **Mecanismos de Mercado Innovadores (Book & Claim) (P3):** Permite crear una demanda temprana por parte de empresas que buscan compensar sus emisiones, sin depender de la logística física del combustible.
- **Economía Circular y Desarrollo Rural (P1, P3):** La valorización del RAC crea una nueva fuente de ingresos para el sector agrícola y genera empleo rural, alineando el proyecto con objetivos de desarrollo sostenible y transición justa.

3.3. Contraste con la Hoja de Ruta de Colombia

Existe una alineación casi total entre los resultados de esta consultoría y el diagnóstico presentado en la Hoja de Ruta de la Aeronáutica Civil. Esto es una señal muy positiva, ya que indica que hay un consenso técnico robusto sobre el camino a seguir.

- **Barreras Coincidentes:** El análisis DOFA presentado en la Hoja de Ruta (resumido en su Figura 7) resalta la "falta de un marco normativo y de incentivos", el "mayor costo del SAF" y la "escasa infraestructura logística", que son las barreras centrales identificadas en nuestro análisis. Igualmente, destaca la "baja movilización de capital privado e inversión extranjera".
- **Oportunidades Compartidas:** La Hoja de Ruta también destaca las mismas oportunidades estratégicas: "crear una nueva industria de SAF en Colombia", "atraer inversión extranjera", "aprovechar la amplia gama de materias primas" y "aprovechar la exitosa experiencia de desarrollo de biocombustibles".

Conclusión del Contraste: Esta consultoría puede ser vista como un estudio de caso aplicado que valida y aterriza, para la región del Valle del Cauca, el diagnóstico y la estrategia nacional planteados en la Hoja de Ruta. Proporciona los datos técnicos y financieros que sustentan la urgencia y la dirección de los ejes de actuación propuestos a nivel nacional.

4. RECOMENDACIONES ESTRATÉGICAS Y MEJORES PRÁCTICAS INTERNACIONALES

Las recomendaciones finales se construyen sobre los hallazgos de los cuatro productos y se enriquecen con las lecciones aprendidas de las estrategias de SAF más avanzadas del mundo.

4.1. Lecciones Clave del Contexto Internacional

El análisis de las hojas de ruta de EE.UU., UE, Canadá, Australia, Brasil, Chile, España e Italia revela un consenso global sobre los factores críticos de éxito.

Lección 1: La Política Pública es el Motor, no el Acompañante.

- **El Modelo de EE.UU. (Supply-Push):** El Inflation Reduction Act (IRA, 2022) es el ejemplo más claro de una política de empuje a la oferta, utilizando generosos créditos fiscales a la producción para hacer la inversión atractiva. Dentro de los objetivos de esta ley se encuentra el de la reducción de los costos de los energéticos y la reducción de emisiones de carbono. Para conseguir su cumplimiento, la ley habilita gran cantidad de recursos económicos en fondos para incentivos, subvenciones y préstamos destinados a apoyar tecnologías de energía limpia, vehículos eléctricos, eficiencia energética y la fabricación nacional de tecnologías limpias.
- **El Modelo de la UE (Demand-Pull):** ReFuelEU Aviation³ impone mandatos de mezcla obligatorios, creando una demanda garantizada que debe incentivar la inversión.
- **La Mejor Práctica:** Una combinación inteligente. Mandatos predecibles para dar certidumbre de mercado, acompañados de incentivos a la producción para asegurar la competitividad. La Hoja de Ruta de Colombia debe avanzar rápidamente en la definición de estos incentivos.

Lección 2: La Colaboración Estructurada es Indispensable.

- **Gobernanza Público-Privada:** Todos los países exitosos han creado plataformas formales de colaboración:
 - **(C-SAF (Canadá):** El Consejo Canadiense para Combustibles de Aviación Sostenibles, reúne a más de 60 aerolíneas y actores clave de

³ En el Anexo A del Producto 3 se encuentra un resumen del reglamento Refuel EU

la industria para impulsar la producción y el uso de combustibles sostenibles de aviación en Canadá. Su objetivo es acelerar la adopción comercial de estos combustibles, promover políticas públicas favorables, crear conciencia sobre sus beneficios ambientales y movilizar a todo el ecosistema relacionado, incluyendo aeropuertos, proveedores tecnológicos y entidades gubernamentales, con el fin de establecer un mercado sustentable y rentable para la aviación baja en carbono en el país.

- **Mesa SAF (Chile):** La Mesa SAF Chile fue una iniciativa público-privada lanzada en octubre de 2022, enfocada en impulsar el desarrollo de combustibles de aviación sostenibles en el país. Coordinada por el Banco Interamericano de Desarrollo y el programa Vuelo Limpio, reunió a entidades gubernamentales, sector privado, instituciones financieras, productores de materias primas y universidades. Su principal logro fue la creación de la Hoja de Ruta SAF 2050, que establece la meta de alcanzar un 50% de uso de combustibles sostenibles en la aviación para 2050 y contempla la instalación de una planta piloto de SAF antes de 2030.
- **SAF Grand Challenge (EE.UU.):** Se trata de una estrategia integral del gobierno de los Estados Unidos destinada a expandir la producción de combustibles sostenibles para aviación (SAF) y cumplir metas concretas como alcanzar 3 mil millones de galones anuales en 2030 y satisfacer el 100% de la demanda para 2050. Esta iniciativa está coordinada por el Departamento de Energía (DOE), el Departamento de Agricultura (USDA) y el Departamento de Transporte (DOT) mediante una hoja de ruta de políticas y actividades conjuntas orientadas a fomentar la innovación y respaldar al sector industrial.
- **Aplicación a Colombia:** La propuesta de un Comité de Seguimiento nacional es la práctica correcta. A nivel regional, una "Mesa SAF Valle del Cauca" es fundamental para traducir la estrategia en proyectos.

Lección 3: La Batalla se Gana en la Logística de la Biomasa Residual.

- **Enfoque en Residuos:** Todas las hojas de ruta maduras (Australia, Canadá, EE.UU.) reconocen que la escala a largo plazo vendrá de la biomasa lignocelulósica de residuos.
- **Inversión en la Cadena de Suministro:** Se prioriza la inversión en "hubs" regionales y proyectos de demostración para la logística de la biomasa.
- **Aplicación a Colombia:** El desafío principal para el Valle no está en la refinería, sino en el campo. Se debe priorizar la inversión en I+D+i y proyectos piloto para la recolección, densificación y pre-procesamiento del RAC.

Lección 4: La Sostenibilidad Certificada es el Pasaporte al Mercado Global.

- **Estándares Globales:** El mercado exige certificaciones. Los estándares de la UE (ISCC EU) son el "gold standard" de facto para la exportación.
- **Enfoque en la Certificación:** Las hojas de ruta de países agroexportadores como Canadá y Australia enfatizan la necesidad de alinear sus sistemas de certificación con los requisitos europeos.
- **Aplicación a Colombia:** Se debe crear un programa (regional o nacional) de apoyo para facilitar la certificación de sostenibilidad de toda la cadena de valor, reduciendo la carga para los productores.

Lección 5: Se Necesita un Portafolio Tecnológico Evolutivo.

- **Pragmatismo Tecnológico:** Todas las hojas de ruta exitosas combinan tecnologías maduras para el corto plazo con I+D en tecnologías emergentes para el futuro.
- **Aplicación a Colombia:** La estrategia de "doble vía" (ATJ 1G -> ATJ 2G) para el Valle del Cauca es una implementación perfecta de este principio, capitalizando fortalezas actuales mientras se construye el futuro.

4.2. Recomendaciones Finales para el Valle del Cauca

A la luz de los análisis y las mejores prácticas internacionales, se consolidan las siguientes recomendaciones, diseñadas como una hoja de ruta accionable.

Eje 1: Gobernanza y Articulación (Acción Inmediata)

- **Constituir la "Mesa SAF Valle del Cauca":** Convocar a la Gobernación, Asocaña, academia y gobierno nacional para formalizar esta plataforma de colaboración. La principal recomendación es que su primer mandato sea el desarrollo de un Plan de Acción regional alineado con los 5 ejes de la Hoja de Ruta Nacional. Es necesario que los actores regionales tengan una voz unificada ante el gobierno nacional, que haya claridad en los requerimientos y necesidades de la región, de manera que los esfuerzos se concentren y se logre agilidad en la actuación.

Eje 2: Política Pública e Incentivos (Cabildeo Estratégico)

- **Abogar por un Paquete de Incentivos Nacional Competitivo:** Utilizar el análisis financiero del Producto 4 para demostrar la necesidad de un paquete

de incentivos, inspirado en el IRA de EE. UU., que podría incluir elementos como por ejemplo:

- **Crédito Fiscal a la Producción (PTC):** Con esto se busca reducir la carga tributaria de los productores y de esta manera mejorar la rentabilidad de la empresa. Es importante que el incentivo se pueda ligar al volumen de producción. De igual manera, se pueden hacer escalas de reducción de GEI, donde los de menores emisiones reciben un estímulo mayor, el cual se ve amplificado por el volumen de producción individual.
- **Crédito Fiscal a la Inversión (ITC):** Actualmente la Ley 2099 establece beneficios tributarios para promover la energía renovable y la eficiencia energética en Colombia. Los principales beneficios son: deducción del impuesto sobre la renta equivalente al 50% de la inversión, exclusión del IVA para bienes y servicios de energía renovable, y depreciación acelerada de activos (hasta el 33.33% anual). También incluye estos beneficios para el hidrógeno verde y azul y la captura de carbono, y para la importación de equipos y materiales. Se propone hacer una revisión de estos beneficios y que para el caso del SAF se puedan tener valores mayores y así poder reducir su costo de producción.
- **Agilización de Permisos** para proyectos de SAF. Es necesario que las entidades gubernamentales estén coordinadas para agilizar los procesos de evaluaciones y asignación de permisos para la producción de SAF. Se propone que haya una línea prioritaria de acción, mediante la definición de un procedimiento claro para todos los agentes, de manera que haya un “fast track” dentro de las entidades para facilitar el flujo del proceso.

Eje 3: Desarrollo de la Cadena de Suministro (Proyectos Prioritarios)

- **Lanzar el "Proyecto Piloto de Logística y Certificación del RAC":** Estructurar un consorcio para un proyecto pre-comercial que valide los costos y operaciones de la cadena de suministro del RAC y, crucialmente, implemente los protocolos para la certificación de sostenibilidad (ISCC). Actualmente hay esfuerzos dispersos entre distintas empresas para la recolección, pretratamiento y transporte de RAC. Esta recomendación implica la suma de esfuerzos entre distintos actores de la cadena para que de manera conjunta se puedan realizar pilotos y operaciones que permitan probar y optimizar tecnologías directamente mediante una operación real en campo. Esta acción aborda directamente la barrera del uso de etanol 1G en Europa, acelerando el camino hacia el etanol 2G.

Eje 4: Impulso a la Inversión y Tecnología (Atracción y Desarrollo)

- **Elaborar un "Prospecto de Inversión" para una Planta de SAF en el Valle:** Consolidar todos los hallazgos de esta consultoría en un documento de alto nivel dirigido a inversores y tecnólogos internacionales.
- **Focalizar el I+D+i en Etanol de Segunda Generación (2G):** Promover que los fondos de ciencia y tecnología nacionales prioricen proyectos de hidrólisis enzimática de RAC y bagazo, por ser la ruta de mayor sinergia tecnológica para la región.

Eje 5: Desarrollo de Mercado y Sostenibilidad (Creación de Demanda)

- **Organizar una Rueda de Negocios para "Offtake Agreements":** Liderar la organización de un evento que reúna a potenciales productores del Valle y aerolíneas para facilitar conversaciones sobre futuros acuerdos de compra.
- **Impulsar un Piloto Nacional de "Book and Claim":** Colaborar con la Aerocivil para diseñar un proyecto piloto de este sistema, creando una demanda temprana que reduzca el riesgo para los primeros productores.

5. BIBLIOGRAFÍA

- **Aeronáutica Civil de Colombia. (Enero 2025).** Cielos Limpios, Economía y Aviación para la vida: Hoja de Ruta de los Combustibles Sostenibles de Aviación en Colombia. Bogotá D.C., Colombia.
- **ASTM E2516-11**, Standard Classification for Cost Estimate Classification System, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.
- **Boeing, Embraer, FAPESP, UNICAMP.** (Junio 2013). Flightpath to Aviation Biofuels in Brazil: Action Plan.
- **C-SAF. (2023).** The C-SAF Roadmap: Building a feedstocks-to-fuels SAF supply chain in Canada.
- **Consorcio Biocombustibles de Colombia (USAENE & TECSOL).** (2023, diciembre). Estudio técnico integral para caracterizar las tecnologías de biocombustibles de segunda y tercera generación. Producto 2, 3 y 4. UPME. Bogotá D.C.
- **CSIRO & Boeing.** (2023). Sustainable Aviation Fuel Roadmap. Australia.
- **ENAC.** (Mayo 2024). A ROADMAP FOR SUSTAINABLE AVIATION FUELS IN ITALY: Enac path for the definition of SAF policy. Roma, Italia.
- **ICF.** (Enero 2025). European SAF Industrial Policy: Ensuring the competitiveness of European aviation, energy, and connectivity.
- **Ministerio de Energía, Junta de Aeronáutica Civil, Agencia de Sostenibilidad Energética.** (Abril 2024). Hoja de Ruta SAF 2050: Combustibles de Aviación Sostenibles. Santiago, Chile.
- **PwC, Iberia, Iberia Express, Vueling, Cepsa, Biocirc.** (Septiembre 2024). Cómo hacer de España el líder europeo de SAF. España.
- **UNAL Palmira. (2016).** Cuantificación, caracterización y georreferenciación de la biomasa residual para aprovechamiento energético en el Valle Geográfico del Río Cauca. Cámara de Comercio de Cali.
- **UPME, et al. (c. 2010).** Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia. Bogotá D.C.
- **U.S. Department of Energy, et al.** (Septiembre 2022). SAF Grand Challenge Roadmap: Flight Plan for Sustainable Aviation Fuel. Washington D.C., USA.
- **Vásquez Pipicano, A. F., & Vidal Restrepo, J. A.** (2022). Análisis económico de alternativas de densificación de residuo agrícola de cosecha (RAC) de caña de azúcar para procesos de combustión. (Trabajo de grado de ingeniería industrial). Universidad del Valle.

ANEXO

Cuadro Resumen: Barreras y Oportunidades para la Industria de SAF en el Valle del Cauca

Categoría	Barreras Identificadas (Desafíos Clave)	Oportunidades Identificadas (Ventajas Estratégicas)
Técnica y Logística	<p>Cadena de Suministro del RAC: Inexistente a escala industrial, requiriendo inversión en logística de recolección, densificación y transporte.</p> <p>Disponibilidad de Hidrógeno Verde: Falta de una oferta local a costo competitivo, lo que incrementaría el CAPEX de la planta de SAF.</p> <p>Infraestructura Aeroportuaria: Necesidad de adecuar la infraestructura de almacenamiento y mezcla de combustible en los aeropuertos.</p>	<p>Industria Consolidada: Ecosistema de la caña de azúcar maduro con infraestructura, logística de etanol y capital humano ya existentes.</p> <p>Potencial de Sinergias: Posibilidad de integrar la planta de SAF con un ingenio para aprovechar vapor, electricidad de cogeneración y otros servicios.</p>
Económica y Financiera	<p>Alto Costo de Producción ("Green Premium"): El SAF es estructuralmente 3-4 veces más caro que el combustible fósil, lo que requiere incentivos para ser viable.</p> <p>Costo de Oportunidad: El etanol y el bagazo ya tienen mercados establecidos (combustible, azúcar, energía, papel) que definen un precio base alto.</p> <p>Acceso a Capital: La alta inversión inicial (CAPEX) y los riesgos de mercado y tecnología dificultan la financiación de proyectos pioneros.</p>	<p>Materia Prima Residual Abundante: El RAC es un residuo de bajo o nulo costo en campo, lo que representa un gran potencial económico si se resuelve la logística.</p> <p>Atracción de "Inversión Verde": El proyecto es un candidato ideal para atraer capital de fondos de impacto, bancos de desarrollo y financiación climática.</p>
Regulatoria y de Políticas Públicas	<p>Ausencia de un Marco de Incentivos Competitivo: Falta de un paquete de incentivos (fiscales, a la producción) que compita con los de EE.UU. (IRA) y la UE.</p> <p>Incertidumbre Regulatoria: Ausencia de una política de estado a largo plazo con metas claras y mecanismos definidos que brinde certidumbre a los inversores.</p>	<p>Marco de la Hoja de Ruta Nacional: La existencia de una política pública que prioriza el SAF crea un entorno favorable y da una señal positiva al mercado.</p> <p>Experiencia Regulatoria Previa: Colombia cuenta con más de una década de experiencia en la regulación de biocombustibles.</p>
De Mercado y Sostenibilidad	<p>Restricciones de Mercado para Etanol 1G: La regulación de la UE (RED III) limita el uso de biocombustibles de 1ª generación, creando una barrera comercial creciente.</p> <p>Complejidad de la Certificación: La certificación de sostenibilidad de toda la cadena de valor (CORSIA/ISCC) es un proceso costoso y complejo.</p> <p>Aseguramiento de la Demanda: Dificultad para firmar acuerdos de compra a largo plazo (offtakes) debido a la volatilidad de precios.</p>	<p>Demanda Garantizada en Mercados de Exportación: Los mandatos de la UE (ReFuelEU) crean una demanda obligatoria y predecible.</p> <p>Mecanismos de Mercado Innovadores: El sistema "Book & Claim" permite crear una demanda temprana y diversificada, reduciendo el riesgo.</p> <p>Economía Circular y Desarrollo Rural: La valorización del RAC genera nuevos empleos e ingresos rurales, alineando el proyecto con objetivos de desarrollo sostenible.</p>