

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
PRODUCTO 1**

Equipo Consultor:
Johan Martínez
Edgar Castillo

Fecha: 20 de mayo de 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:



TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. Marco del Proyecto ATCP 90: Viabilidad de una Planta SAF en el Valle del Cauca	5
1.2. Propósito y Objetivos del Producto 1: Análisis de Disponibilidad de Materias Primas	5
1.3. Alcance y Limitaciones del Análisis de Disponibilidad	5
1.4. Fuentes de Información Utilizadas	6
2. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE MATERIAS PRIMAS PARA SAF EN EL VALLE DEL CAUCA	7
2.1. Definición de Materias Primas Potenciales	7
2.2. Criterios de Evaluación:	7
2.3. Identificación de Aspectos Limitantes y Habilitantes	8
3. ANÁLISIS DE DISPONIBILIDAD DE BIOMASA RESIDUAL LIGNOCELULÓSICA EN EL VALLE DEL CAUCA	9
3.1. Residuos de la Agroindustria de la Caña de Azúcar	9
3.1.1. Bagazo y Residuos Agrícolas de Cosecha (RAC)	9
3.1.1.1. Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia	9
3.1.1.2. Cuantificación, caracterización y georreferenciación de la biomasa residual para aprovechamiento energético en el Valle Geográfico del Río Cauca	10
3.1.1.3. Estudio técnico integral para caracterizar las tecnologías de biocombustibles de segunda y tercera generación	12
3.1.2. Vinazas	13
3.1.3. Información actualizada y estimaciones de disponibilidad de biomasa de caña de azúcar	14
3.1.4. Aspectos habilitantes y limitantes de las biomásas del sector azucarero	15
3.1.4.1. Residuo agrícola de cosecha – RAC:	15
3.1.4.1.1. Aspectos habilitantes:	15
3.1.4.1.2. Aspectos limitantes:	16
3.1.4.2. Bagazo	16
3.1.4.2.1. Aspectos habilitantes	16

3.1.4.2.2. Aspectos limitantes	17
3.1.4.3. Vinaza	17
3.1.4.3.1. Aspectos habilitantes	17
3.1.4.3.2. Aspectos limitantes	18
3.2. Residuos Forestales en el Valle del Cauca	18
3.2.1. Cuantificación	19
3.2.2. Potencial para rutas tecnológicas de producción de SAF	20
3.2.2.1. Aspectos habilitantes y limitantes	21
3.2.2.1.1. Aspectos habilitantes	21
3.2.2.1.2. Aspectos limitantes	21
3.3. Residuos de otros cultivos agrícolas en el Valle del Cauca	21
3.3.1. Cuantificación	22
3.3.2. Aspectos habilitantes	23
3.3.3. Aspectos limitantes	24
4. ANÁLISIS DE DISPONIBILIDAD DE ETANOL DE PRIMERA GENERACIÓN EN EL VALLE DEL CAUCA COMO MATERIA PRIMA PARA SAF (RUTA ALCOHOL TO JET - ATJ)	25
4.1. Disponibilidad Actual	25
4.2. Potencial de Excedentes o Redireccionamiento para Producción de SAF	26
4.3. Competitividad del Etanol como Insumo para SAF	27
4.4. Aspectos Limitantes y Habilitantes	30
4.4.1. Aspectos Habilitantes	30
4.4.2. Aspectos Limitantes	31
5. FACTORES CLAVE QUE AFECTAN LA DISPONIBILIDAD REAL DE BIOMASA LIGNOCELULÓSICA PARA SAF EN EL VALLE DEL CAUCA	32
5.1. Logística de Recolección y Procesamiento	32
5.1.1. RAC de caña de azúcar	32
5.1.2. Bagazo	33
5.1.3. Vinazas	34
5.1.4. Residuos forestales	34
5.1.5. Etanol de primera generación	34
5.2. Usos Actuales y Competencia por la Biomasa en el Valle del Cauca	35
5.2.1. RAC de caña de azúcar	35
5.2.2. Bagazo	35

5.2.3.	Vinazas	36
5.2.4.	Residuos forestales	36
5.2.5.	Etanol de primera generación	37
5.3.	Consideraciones económicas y de sostenibilidad	37
6.	SÍNTESIS Y PRIORIZACIÓN: LA BIOMASA MÁS ABUNDANTE Y MAYORMENTE DISPONIBLE EN EL VALLE DEL CAUCA PARA SAF.	39
6.1.	Consolidación de la Abundancia de Biomasa Lignocelulósica y Etanol en el Departamento	39
6.2.	Evaluación de la Disponibilidad Real para SAF en el Valle del Cauca	40
6.3.	Identificación y Justificación de las Materias Primas Priorizadas para SAF en el Departamento del Valle del Cauca	41
7.	CONCLUSIONES SOBRE LA DISPONIBILIDAD DE MATERIAS PRIMAS (BIOMASA Y ETANOL) PARA UNA PLANTA SAF EN EL VALLE DEL CAUCA	43
8.	RECOMENDACIONES	46
8.1.	Futuros estudios	46
8.2.	Desarrollo de políticas y toma de decisiones	47
9.	BIBLIOGRAFÍA	49

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Marco del Proyecto ATCP 90: Viabilidad de una Planta SAF en el Valle del Cauca

El presente documento se enmarca en la Asistencia Técnica de Corto Plazo (ATCP) 90, cuyo objetivo general es "Determinar la viabilidad de implementación de una planta de SAF en el Valle del Cauca". Esta iniciativa busca explorar el potencial de la región para contribuir a las metas de descarbonización del sector aéreo mediante la producción de combustibles sostenibles con base en la disponibilidad de recursos con los que cuenta la región.

1.2. Propósito y Objetivos del Producto 1: Análisis de Disponibilidad de Materias Primas

Este informe corresponde al Producto 1 de la ATCP 90. Su propósito fundamental es realizar un análisis de la disponibilidad de las materias primas clave, principalmente biomasa residual lignocelulósica y bioetanol de primera generación, existentes en el departamento del Valle del Cauca, que podrían servir como insumos para la producción de Combustible Sostenible de Aviación (SAF). Se busca identificar los aspectos tanto limitantes como habilitantes que condicionan dicha disponibilidad, con el fin de proporcionar una base sólida para la evaluación de la viabilidad para establecer una planta de SAF en la región.

1.3. Alcance y Limitaciones del Análisis de Disponibilidad

El alcance de este análisis se establece geográficamente al departamento del Valle del Cauca. En algunos casos se considerará un alcance un poco mayor, de acuerdo con la disponibilidad de la información. Se evaluarán las principales fuentes de biomasa lignocelulósica (con énfasis en los residuos de la agroindustria de la caña de azúcar y residuos forestales) y la oferta de bioetanol de primera generación. Otras biomásas o residuos industriales se mencionarán de forma general en la medida que la disponibilidad de información lo permita. Las limitaciones del presente análisis radican en la dependencia de la información contenida en los estudios de referencia, cuyas fechas de publicación varían (2010, 2016 y 2023), lo que implica diferentes horizontes temporales para los datos base. Las proyecciones de disponibilidad se basarán en la información disponible en dichos estudios y la que los gremios interesados puedan facilitar y no implicarán una nueva recolección de datos primarios a gran escala.

1.4. Fuentes de Información Utilizadas

Este análisis se fundamenta en la revisión, comparación y síntesis de tres estudios principales:

- 1.4.1. **"Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia" (UPME et al., 2010):** Proporciona un inventario base a nivel nacional y departamental de diversas biomasa residual. Es uno de los insumos fundamentales como punto de partida para identificar el potencial de biomasa disponible en el Valle del Cauca.
- 1.4.2. **"Cuantificación, caracterización y georreferenciación de la biomasa residual para aprovechamiento energético en el Valle Geográfico del Río Cauca" (UNAL Palmira, 2016):** Este estudio contratado por la Cámara de Comercio de Cali en el marco de las iniciativas Clúster, ofrece datos detallados y más recientes (2014-2015) sobre la cuantificación y caracterización de residuos de caña de azúcar y forestales específicamente para el Valle del Cauca.
- 1.4.3. **"Estudio técnico integral para caracterizar las tecnologías de biocombustibles de segunda y tercera generación" (Consorcio Biocombustibles de Colombia, 2023):** Aunque enfocado en biocombustibles avanzados y biorrefinerías a nivel nacional, utiliza datos actualizados y proyecciones que son pertinentes para evaluar el potencial de conversión de las materias primas del Valle del Cauca, especialmente de la caña de azúcar, para la producción de biocombustibles como el bioetanol 2G y el biometano, liberando potencialmente etanol 1G o biomasa para SAF.

2. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE MATERIAS PRIMAS PARA SAF EN EL VALLE DEL CAUCA

2.1. Definición de Materias Primas Potenciales

De acuerdo con los Términos de Referencia (TdR) y con base en los estudios analizados, se han seleccionado las siguientes materias primas promisorias:

- **Biomasa Lignocelulósica:** Esta corresponde principalmente a la biomasa originaria de la caña de azúcar, es decir, bagazo como residuo industrial y Residuos Agrícolas de Cosecha (RAC). Otra biomasa de interés son los residuos forestales. Estas biomásas son insumos que pueden ser aprovechados mediante rutas tecnológicas como la gasificación, Fischer Tropsch o la producción de alcohol celulósico (segunda generación), para su utilización en una vía Alcohol to Jet (ATJ).
- **Bioetanol de Primera Generación (1G):** Es el que actualmente se produce en el país, principalmente en el valle del río Cauca. Es la materia prima más inmediata con la que cuenta la región.

Se realizará un análisis general de la presencia de otras biomásas, aunque los estudios muestran que su volumen es menor en comparación con las anteriores.

2.2. Criterios de Evaluación:

- **Abundancia y Cuantificación:** Se realiza una comparación de las cifras de producción de cada materia prima (t/año) en el Valle del Cauca, de acuerdo con los estudios analizados. Se realizará una estimación del potencial de conversión a SAF basado en rendimientos teóricos o reportados para rutas tecnológicas relevantes.
- **Disponibilidad Real para una Planta SAF:** Se analiza cual es el uso que actualmente tiene cada materia prima, como por ejemplo la cogeneración, mejora de suelos o el mercado de alcohol carburante. Esto permitirá estimar la cantidad que podría estar disponible para una planta de SAF.
- **Competitividad como Materia Prima para SAF:** Se evaluará cualitativamente la competitividad de cada materia prima en función de su costo, disponibilidad y adecuación a las tecnologías de producción de SAF.

2.3. Identificación de Aspectos Limitantes y Habilitantes

Para cada materia prima, se identificarán factores que dificultan (limitantes) o facilitan (habilitantes) su uso para la producción de SAF en el Valle del Cauca. Esto incluye aspectos técnicos, logísticos, económicos, de mercado y, si la información lo permite, regulatorios.

3. ANÁLISIS DE DISPONIBILIDAD DE BIOMASA RESIDUAL LIGNOCELULÓSICA EN EL VALLE DEL CAUCA

En esta sección se procederá a analizar la disponibilidad de biomasa residual lignocelulósica en el departamento del Valle y en la región, dependiendo de la disponibilidad de información. Se encuentran tres grupos principales de biomasa, las cuales corresponden a las originadas en el cultivo de la caña de azúcar, la actividad forestal comercial y las correspondientes a otros cultivos agrícolas.

3.1. Residuos de la Agroindustria de la Caña de Azúcar

Dentro de la operación relacionada con la caña de azúcar, se pueden obtener 3 biomasa principales: los residuos de cosecha (RAC), el bagazo de la caña resultado de la molienda en el ingenio y la vinaza, resultado de la destilación del alcohol.

3.1.1. Bagazo y Residuos Agrícolas de Cosecha (RAC)

3.1.1.1. Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia

De acuerdo con la información analizada, se tienen diferentes estimaciones de la cantidad de biomasa generada y de su composición entre RAC y bagazo.

El estudio que tiene una mayor cobertura corresponde al Atlas de Biomasa Residual de la UPME, publicado en 2010. En este documento se encuentra la información consignada en la **Tabla 1**:

Tabla 1: Potencial energético departamental para biomasa residual de caña de azúcar

DEPARTAMENTO	ÁREA SEMBRADA (ha)	PRODUCCIÓN (t producto/año)	CANTIDAD DE RESIDUO (t/año)	POTENCIAL ENERGÉTICO (TJ/año)
Caldas	2.625	32.812	194.903	1.487,75
Cauca	34.486	390.142	2.317.433	17.689,55
Cesar	1.734	10.924	64.889	495,31
Norte de Santander	969	10.420	61.895	472,46
Risaralda	2.719	38.357	227.841	1.739,16
Valle del Cauca	168.033	2.132.596	12.667.620	96.694,67
Total	210.566	2.615.251	15.534.581	118.578,90

Fuente: UPME, 2010.

Como se observa en la tabla, la mayor cantidad de residuos de caña de azúcar proviene del valle del río Cauca, una región conformada por los departamentos de Valle, Cauca, Risaralda y Caldas. Estos 4 departamentos aportan el 99% del total de residuos de caña de azúcar del país.

En el Atlas se realiza la estimación de la producción de residuos, con base en la producción del producto principal. Para el caso particular de la caña, la definición del factor de generación de residuos de biomasa corresponde a¹:

- 3,26 toneladas de residuo por tonelada de producto principal para el caso del RAC (hojas, cogollos).
- 2,68 toneladas de residuo por tonelada de producto principal para la estimación de la producción de bagazo.

En ambos casos el producto principal que se toma como referencia es la producción de azúcar. De acuerdo entonces con la información del Atlas, se tiene que anualmente se producen **8.525.718 toneladas de RAC y 7.008.873 de bagazo por año.**

3.1.1.2. Cuantificación, caracterización y georreferenciación de la biomasa residual para aprovechamiento energético en el Valle Geográfico del Río Cauca

En el documento realizado por la Universidad Nacional de Palmira en 2016² también se realiza una cuantificación de la biomasa residual de la caña de azúcar. Los resultados difieren significativamente de los reportados en el Atlas, principalmente porque en este estudio se tomaron en consideración algunas restricciones importantes:

- Sólo se consideró el RAC producto de la cosecha mecánica en verde, que en 2014 y 2015 se estimó en 39% y 44,7% del área, respectivamente.
- En el estudio adoptan las recomendaciones de expertos contactados que sugieren no retirar más del 50% de los residuos, como medida de mantenimiento del aporte de materia orgánica al suelo.

La ventaja de este enfoque es que aproxima de una mejor manera al volumen aprovechable para fines energéticos.

¹UPME 2010, Tabla 29.

²UNAL Palmira, 2016

Tabla 2: Producción de RAC aprovechable en base húmeda por zona en los años 2014 y 2015

ZONA	NÚMERO DE MUNICIPIOS	PRODUCCIÓN DE RAC (t)	
		2014	2015
Centro	6	205.279	243.457
Centro - Norte	9	105.982	132.660
Centro - Sur	5	220.639	237.300
Norte	19	142.767	167.010
Sur	9	155.914	172.023
Total	48	830.582	952.450

Fuente: Tomado de UNAL PALMIRA, 2016, Tabla 8.

De la **Tabla 2** se observa que entre el 69% y 70% de la producción de RAC se encuentra entre los municipios ubicados entre el centro y sur del valle del río Cauca.

En este mismo estudio se realiza también una estimación de indicadores de producción de RAC para la región con base en las principales variedades sembradas, como se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 3: Indicadores de producción de RAC por variedad en el valle del río Cauca

VARIEDAD	t/ha	t/ t caña
CC-11940	34,1070	0,2657
CC-8592	30,6149	0,2479
CC-934418	26,9661	0,2624
Otras	30,5627	0,2587

Fuente: UNAL PALMIRA, 2016, Tomado de las Tablas 6 y 7.

La Universidad Nacional de Palmira utilizó las proporciones en las que las distintas variedades estaban sembradas en la región para estimar el volumen de producción total de residuos. De la Tabla 9 del estudio se extraen las siguientes proporciones:

Tabla 4: Proporción de área sembrada en caña según la variedad

Variedad	2014	2015
CC-8592	57,84%	48,37%
CC-934418	15,32%	16,45%
CC-11940	6,44%	14,55%
Otras	20,40%	20,63%
Total	100,00%	100,00%

Fuente: UNAL PALMIRA, 2016, Extraído de la Tabla 9.

Con base en información de la **Tabla 3** y **Tabla 4**, entonces se puede estimar un factor global de producción de RAC por tonelada de caña y por hectárea. Es importante anotar que este factor tiene la limitación de mantener fijas las proporciones de las variedades, especialmente en el indicador de toneladas de RAC por hectárea. En el indicador de toneladas de RAC por tonelada de caña, la desviación es menor.

Tabla 5: Indicadores de producción de RAC, promedio.

	t RAC / t caña	t RAC / ha
2014	0,2613	32,3891
2015	0,2608	31,7624

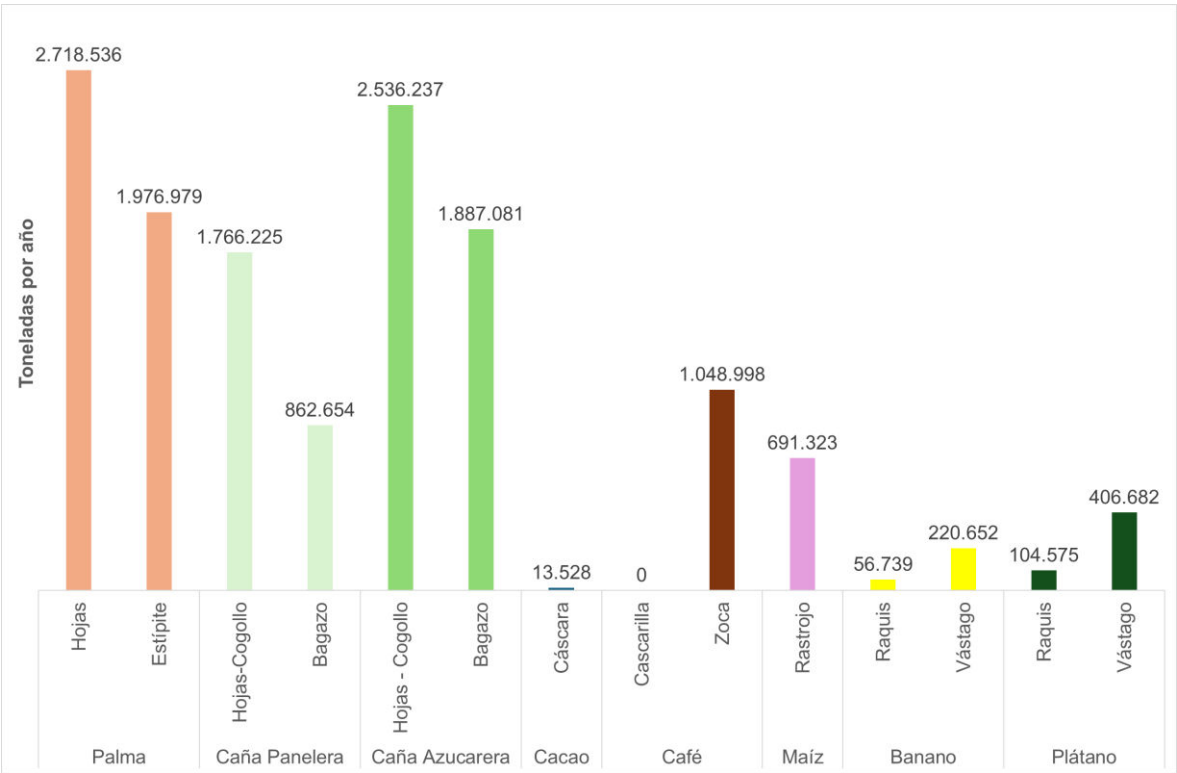
Fuente: Elaboración propia con base en información de UNAL PALMIRA, 2016.

3.1.1.3. Estudio técnico integral para caracterizar las tecnologías de biocombustibles de segunda y tercera generación

De otro lado, en el estudio realizado por el Consorcio Biocombustibles de Colombia en el 2023, se presenta una tabla de donde se obtiene la información para elaborar el **Gráfico 1**, donde se resume el volumen de biomasa potencial que hay disponible en el país para aplicaciones energéticas. Se destaca nuevamente la caña de azúcar como uno de los cultivos con mayor potencial de biomasa en el país. Dentro de la lista no hay cultivos que estén presentes en gran extensión en el departamento del Valle, por lo que se reafirma que es la caña de azúcar el cultivo que potencialmente más biomasa puede aportar para el proyecto.

De acuerdo con el estudio, en el valle del río Cauca hay un potencial de biomasa de 2,5 millones de toneladas de RAC y 1,9 millones de toneladas de bagazo.

Gráfico 1: Potencial técnico de disponibilidad de Biomasa Residual Lignocelulósica (BRL) en Colombia



Fuente: Consorcio Biocombustibles de Colombia, 2023.Extraído de la Tabla 5-1, Producto 3.

3.1.2. Vinazas

La vinaza corresponde al subproducto de la producción de etanol. En el proceso de producción de alcohol los jugos azucarados se fermentan mediante la adición de levadura, la cual es un microorganismo que se encarga de la transformación de los azúcares en alcohol. Mediante el proceso de destilación, se realiza la separación del alcohol de “lo demás”. Ese subproducto es el que se llama vinaza.

Actualmente en el valle del río Cauca, la vinaza es utilizada para la elaboración de fertilizantes, mediante un proceso de concentración y enriquecimiento con otros elementos, de acuerdo con las necesidades agronómicas de los suelos en donde se vaya a aplicar.

Esta vinaza contiene una cantidad importante de materia orgánica que podría ser aprovechada en usos alternativos. De acuerdo con el estudio de Biorrefinerías³ se tiene la siguiente caracterización:

Tabla 6: Composición fisicoquímica de la vinaza

Parámetro	Valor
Humedad (%)	90-95
Poder Calorífico Inferior (MJ/kg)	16,99
pH	4,7
ST (g/l)	42,8
SV (g/l)	77,0
Sólidos en suspensión (g/l)	57,1
Sólidos disueltos (g/l)	25,9
Sólidos totales (g/l)	80,3
Proteínas (g/l)	<0,1
DBO5 (g/l)	14,5
DQO (g/l)	15,3
Compuestos orgánicos totales (g/l)	182,0
N (%)	0,73
Rendimiento Biogás (m ³ /m ³ _{vinaza})	16,4

Fuente: Consorcio Biocombustibles de Colombia, 2023. Tabla 4-7, Producto 3.

Dado que la producción de etanol en el mundo es una tecnología madura, la producción de vinaza es conocida. En las tecnologías tradicionales se obtienen cerca de 14 litros de vinaza por cada litro de alcohol. En el valle del río Cauca, la tecnología implementada hace un proceso de recirculación para reducir el consumo de agua y reducir la cantidad de vinaza producida. Esto lleva a que se produzcan alrededor de 8 litros de vinaza por litro de alcohol. Posteriormente, los ingenios del valle del río Cauca tienen sistemas de concentración que reducen aún más esa proporción, llegando a

³ Consorcio Biocombustibles de Colombia, 2023

casos donde puede ser 1:1 (un litro de vinaza, por cada litro de alcohol producido) o incluso menos.

De acuerdo con el análisis realizado por el Consorcio Biocombustibles de Colombia, con base en la vinaza disponible, esta se podría utilizar para producir cerca de 900.000 m3 de biogás por año. Este volumen considera una producción de 400 millones de litros anuales de alcohol, y 11 m3 de vinaza por m3 de etanol (vinaza sin concentrar y producto de un proceso de primera generación).

Esto demuestra el gran potencial que existe en el sector para la utilización de la vinaza como biomasa residual. De igual manera, esta biomasa constituye un potencial para desarrollar alternativas de producción de SAF en caso de que no se produzca el biogás. Para ello se deben considerar tecnologías que aún están en proceso de desarrollo como la gasificación.

3.1.3. Información actualizada y estimaciones de disponibilidad de biomasa de caña de azúcar

De acuerdo con la información recibida por parte de Cenicaña, para el caso de la biomasa generada por el sector azucarero se tiene lo siguiente:

Tabla 7:Indicadores de producción de caña y bagazo

Indicador	Unidad	2020	2021	2022	2023	2024
Área Cosechada	ha.	196.907	172.398	184.731	198.957	180.373
Rendimiento de cultivo	TCH	112,5	127,3	117,8	102,1	113,9
Caña molida (sector)	t		22.312.873	22.562.036	20.494.183	21.691.623
Caña molida (Valle del Cauca)	t		15.319.011	15.939.053	14.825.267	15.838.880
Factor de bagazo	t bag. / t caña molida		28,1	29,1	28,9	28,8

Fuente: Cenicaña, Asocaña.

De ahí se puede deducir que para el año 2024 se produjeron 6,2 millones de toneladas de bagazo en el sector, de las cuales 4,7 millones de toneladas fueron producidas en el Valle del Cauca.

De acuerdo con información de Asocaña y Cenicaña, en 2023 de los 5,9 millones de toneladas de bagazo producida, se consumieron en las calderas de los ingenios un total de 4,7 millones de toneladas. De otro lado, 1,1 millones de toneladas fueron comercializadas casi en su totalidad para la producción de papel.

Sobre la producción de RAC, Cenicaña brinda un rango nuevo de producción el cual corresponde a 260,3 k/t caña. (+/- 4,9), o bien 30,4 t/ha (+/- 2,9). Estos indicadores son bastante consistentes con los presentados en la Tabla 5. Ahora bien, el volumen de RAC calculado si difiere notablemente con el resultado obtenido por la Universidad

Nacional de Palmira en 2016, en razón a que la cosecha mecánica ha avanzado de manera importante durante los últimos años. De acuerdo con Asocaña, en 2024 el 76,3% del área cosechada se realizó mecánicamente, mientras que en el mencionado estudio en el 2016 se contemplaba entre el 39% y el 45%. Esto entonces significa un incremento en la disponibilidad de esta biomasa.

De acuerdo con lo anterior, el volumen de RAC para los últimos dos años es el siguiente:

Tabla 8: Disponibilidad de RAC en el Valle del Cauca

	Unidades	Total Sector	Valle del Cauca
Caña molida	t	21.691.623	15.838.880
kilos RAC / t caña		260,3	260,3
RAC	t	5.646.329	4.122.860
Proporción cosecha mecánica	%	76,3	76,3
Proporción dejada en campo	%	50,0	50,0
Disponibilidad de RAC	t	2.154.075	1.572.871

Fuente: Cálculos propios con base en información de Cenicaña y Asocaña.

Con esta información se concluye que en el departamento del Valle del Cauca existe una **disponibilidad de RAC de al menos 1,6 millones de toneladas anuales** que tienen el potencial de ser aprovechadas en aplicaciones energéticas como la producción de SAF.

3.1.4. Aspectos habilitantes y limitantes de las biomásas del sector azucarero

En este apartado se presenta una recopilación de los principales aspectos habilitantes y limitantes de las biomásas identificadas en el sector azucarero por parte de los estudios analizados.

3.1.4.1. Residuo agrícola de cosecha – RAC:

3.1.4.1.1. Aspectos habilitantes:

- **Alta Disponibilidad:** El Valle del Cauca se destaca como departamento que tiene una producción significativa de caña de azúcar, razón por la cual produce una gran cantidad de RAC cada año. De acuerdo con los cálculos más recientes, el departamento del Valle cuenta con un potencial de 1,6 millones de toneladas de RAC.

- **Fuente de lignocelulosa:** La composición del RAC es ideal para tecnologías de producción de alcoholes de segunda generación, para el aprovechamiento mediante tecnologías como la gasificación para SAF (ruta Fischer Tropsch) o la producción de biogás.
- **Beneficio Ambiental:** Aprovechar el RAC estimula la implementación de la cosecha mecanizada y en verde.
- **Cosecha en Verde:** El desarrollo de la cosecha mecanizada en verde permite dejar en el campo los residuos para su posterior recolección. Aún existen retos en este proceso, que va de la mano con la actividad de recolección y transporte, pero cada vez hay mayor experiencia internacional y local al respecto.
- **Interés en Valorización:** Existe un creciente interés por revalorizar este residuo, como lo reflejan los estudios analizados.

3.1.4.1.2. Aspectos limitantes:

- **Logística de Recolección y Transporte:** Hasta el momento, recoger y transportar RAC es costoso y complicado debido a su volumen y dispersión. Aún faltan por afinar las mejores tecnologías para ello.
- **Conservación de las propiedades del Suelo:** Hasta el momento no hay una recomendación precisa de Cenicaña sobre el volumen de residuos que deben quedarse en el suelo. En el estudio de la Universidad Nacional de Palmira se establece un 50% como práctica recomendable para evitar una degradación del suelo por la remoción de la materia orgánica. En Brasil, hay zonas que permiten remover hasta el 80% de los residuos, mientras que en zonas de restricción no se permite.
- **Contenido de humedad:** El RAC fresco puede tener alto contenido de humedad, lo que implica que hay que realizar algún tratamiento previo para poder aprovecharlo en alternativas energéticas. Esto implica un costo adicional.
- **Pretratamiento:** El RAC requiere pretratamientos para ser usado en tecnologías avanzadas, lo que implica costos adicionales.

3.1.4.2. Bagazo

3.1.4.2.1. Aspectos habilitantes

- **Producción concentrada en los ingenios:** Se produce directamente en los ingenios azucareros, lo que elimina los costos y la complejidad logística de recolección desde el campo.
- **Contenido energético:** Es una excelente fuente de biomasa lignocelulósica con un buen poder calorífico, ya aprovechado para cogeneración.

- **Material homogéneo:** En comparación con el RAC, el bagazo tiene características más uniformes al salir del proceso de molienda.
- **Ideal para Tecnologías Avanzadas:** Ideal para gasificación, producción de etanol celulósico, y otros procesos de biorrefinería.

3.1.4.2.2. Aspectos limitantes

- **Es el combustible para la cogeneración:** Este es la principal limitante. La gran mayoría del bagazo producido en los ingenios del Valle del Cauca ya se utiliza como combustible en sus propias calderas para generar el vapor y la electricidad necesarios para el proceso de producción de azúcar y etanol.
- **Limitada disponibilidad:** Solo una pequeña fracción podría considerarse excedentaria o disponible para nuevos usos energéticos sin afectar la autosuficiencia energética de los ingenios. Esta disponibilidad podrá incrementarse en la medida que pueda utilizarse RAC para la combustión en las calderas.
- **Costo de Oportunidad:** Actualmente el principal costo de oportunidad del bagazo es el energético. Un menor uso en calderas para la cogeneración implicaría una menor generación de excedentes de energía, por lo que un uso alternativo debería al menos cubrir los ingresos dejados de percibir por las ventas de energía a la red. De otro lado, la producción de papel es el segundo mayor uso del bagazo, lo que se constituye también en un costo de oportunidad el dejar de atender ese requerimiento. De acuerdo con la información suministrada por Cenicaña, la estimación que tienen para el costo del bagazo en 2024 para la venta para la papelera es de \$80.000 - \$87.000 por tonelada estando entero y entre \$120.000 y \$130.000 por tonelada de fibra.
- **Humedad:** Aunque menor que el RAC fresco, el bagazo aún tiene un contenido de humedad significativo (alrededor del 50%) que puede necesitar reducción para ciertos procesos.

3.1.4.3. Vinaza

3.1.4.3.1. Aspectos habilitantes

- **Producción concentrada en las destilerías:** Se producen en las destilerías anexas a los ingenios, lo que evita transportes para su procesamiento.
- **Alto contenido de materia orgánica:** Son ricas en materia orgánica biodegradable, lo que las hace ideales para la producción de biogás/biometano mediante digestión anaerobia (DA).

- **Potencial probado:** Varios ingenios en Brasil ya cuentan con sistemas de DA para tratar sus vinazas y producir biogás. En Colombia también existen experiencias especialmente en el sector de la palma de aceite.
- **Subproducto con valor nutricional para el campo:** El digestato de la DA de vinazas es rico en potasio y otros nutrientes, pudiendo usarse como biofertilizante, cerrando ciclos y reduciendo el uso de fertilizantes químicos.

3.1.4.3.2. Aspectos limitantes

- **Alto Contenido de Agua:** Las vinazas son principalmente agua (90-95%), lo que implica manejar grandes volúmenes para recuperar una cantidad relativamente menor de energía o materia orgánica. Esto puede encarecer algunos procesos de concentración o tratamiento.
- **Manejo de Grandes Volúmenes:** La logística para el manejo, almacenamiento y tratamiento de los grandes volúmenes de vinaza requiere infraestructura e inversión significativa.
- **Potencial Corrosivo o Inhibidor:** Dependiendo de su composición (pH, sales), pueden requerir ajustes o pretratamientos para optimizar la digestión anaerobia o evitar problemas en los equipos.
- **Enfoque en Tratamiento más que en Maximización Energética:** Históricamente, el enfoque principal para las vinazas ha sido su tratamiento para cumplir con normativas ambientales, y no necesariamente la optimización de la recuperación energética.
- **Disponibilidad para SAF es Indirecta:** Las vinazas no son una materia prima directa para SAF. Su valorización energética (biogás/biometano) puede, sin embargo, liberar otras biomasas (RAC, bagazo) al reducir la demanda energética interna de los ingenios, o mejorar la sostenibilidad global del etanol 1G si este se usa como precursor de SAF.
- **Manejo del digestato:** Aún no se han encontrado alternativas de manejo del digestato que den tranquilidad a los productores. Aún se requiere investigación en este aspecto.

3.2. Residuos Forestales en el Valle del Cauca

El uso de residuos forestales para la generación de energía y biocombustibles avanzados, como el SAF, ha despertado un creciente interés debido a su composición lignocelulósica y su capacidad de no competir con la producción alimentaria. En el departamento del Valle del Cauca, existen plantaciones forestales comerciales que generan residuos tanto en las operaciones de explotación en campo como en los procesos industriales de transformación de la madera.

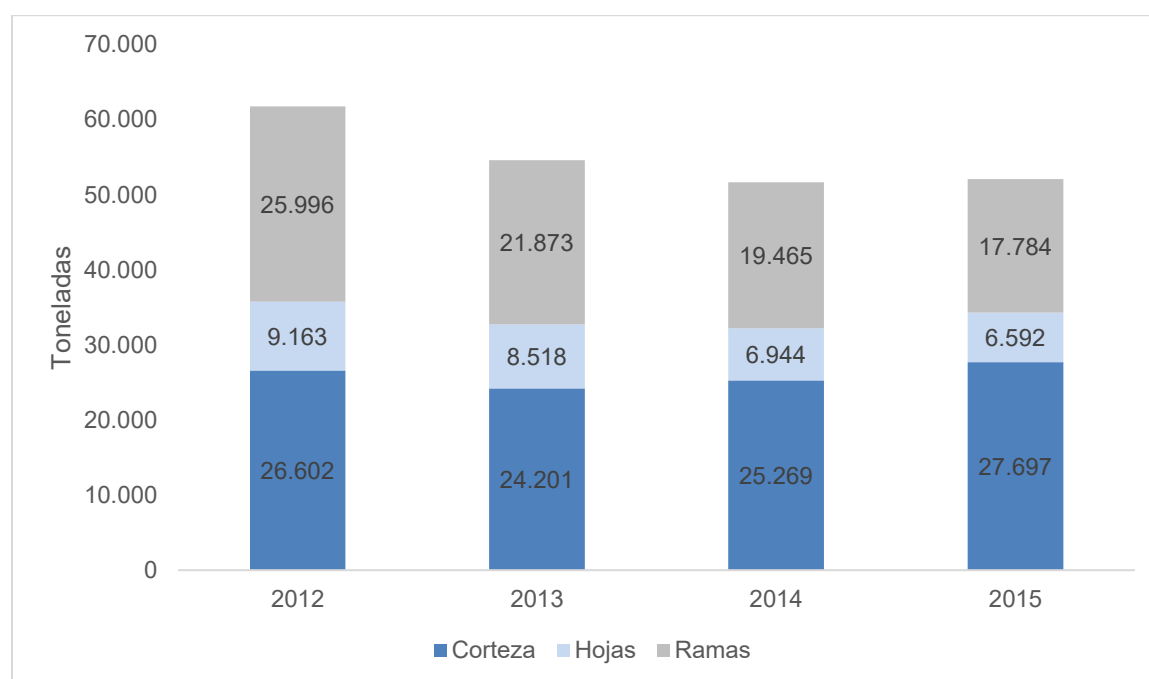
3.2.1. Cuantificación

De acuerdo con el Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia, los residuos forestales son una fuente importante de biomasa residual. En la producción maderera se aprovecha comercialmente el 20% del árbol. El 40% se queda en el campo en forma de hojas y ramas y el restante 40% corresponde a astillas, corteza y aserrín, como residuos del proceso de aserrío.

En el estudio de la Universidad Nacional de Palmira⁴ se estudiaron plantaciones forestales ubicadas en los departamentos que conforman el valle del río Cauca: Valle, norte del Cauca, y Risaralda, tanto en la cordillera central como en la occidental.

De acuerdo con lo presentado en el **Gráfico 2**, en el **año 2015 se produjeron 52.073 toneladas de residuos forestales** en la región, de los cuales 28 mil correspondieron a cortezas, casi 18 mil toneladas correspondieron a ramas y el restante a hojas.

Gráfico 2: Producción anual de biomasa forestal en el Valle, Cauca y Risaralda



Fuente: Universidad Nacional de Palmira, 2016. Figura 17.

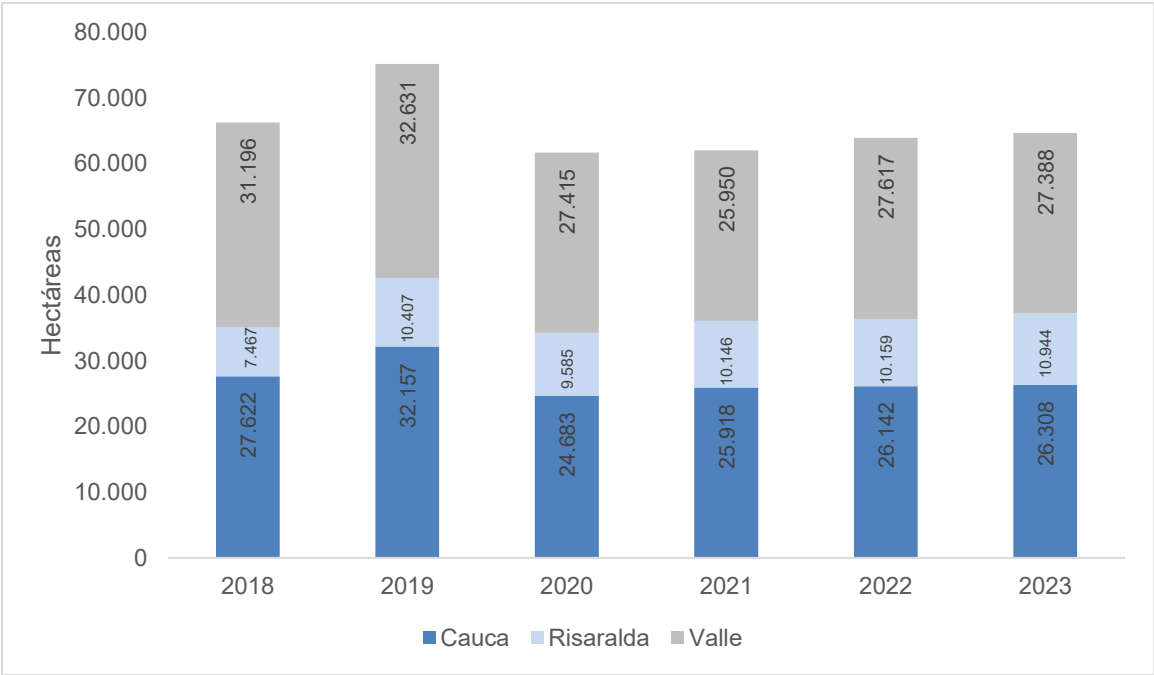
Es importante mencionar que dependiendo de las especies forestales que se utilicen en las plantaciones, hay variaciones en la cantidad de biomasa residual que producen. Una característica primordial en la biomasa para su aprovechamiento energético

⁴ “Cuantificación, caracterización y georreferenciación de la biomasa residual para aprovechamiento energético en el Valle Geográfico del Río Cauca” (UNAL Palmira, 2016)

corresponde al contenido de hemicelulosa, celulosa y lignina. En los análisis realizados en el estudio se concluye que no hay diferencias significativas entre las especies.

Dado el alcance de esta consultoría, se revisó la información documental correspondiente a las plantaciones forestales comerciales. Se encontró información en las publicaciones del Boletín Estadístico Forestal. En el Gráfico 3 se presenta la evolución del área sembrada para el periodo 2018 – 2023.

Gráfico 3: Área sembrada de plantaciones forestales comerciales en el Valle, Cauca y Risaralda



Fuente: Boletín Estadístico Forestal, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.

Con base en la información anterior se puede observar que el área sembrada en plantaciones forestales comerciales ha permanecido relativamente estable a lo largo del tiempo. Dado que no se contó con más información, es necesario suponer que el área no ha presentado un crecimiento estructural y por lo tanto los resultados obtenidos en el estudio realizado por la Universidad Nacional de Palmira aún pueden servir de referencia.

3.2.2. Potencial para rutas tecnológicas de producción de SAF

Una de las alternativas tecnológicas que se podría implementar para el aprovechamiento de los residuos forestales corresponde a la gasificación y proceso de Fischer Tropsch (FT). De acuerdo con el estudio realizado por el Consorcio Biocombustibles de Colombia (2023), se puede tomar como valor de referencia 0,182 kg de SAF por kg de biomasa residual. Con este indicador se deduce entonces que la cantidad de biomasa forestal actual (52 mil toneladas del año 2015) podrían producirse cerca de 2,5 millones de galones de SAF – FT.

Este volumen representa una escala muy pequeña que podría no ser competitivo. Para hacer una evaluación precisa se requiere información más reciente y detallada.

3.2.2.1. Aspectos habilitantes y limitantes

3.2.2.1.1. Aspectos habilitantes

- **Lignocelulosa:** Es una biomasa que tiene el potencial de ser transformada en biocombustibles de segunda generación y en SAF.
- **Región productora:** En el valle del río Cauca existe una industria forestal formal y organizada de tipo comercial.
- **No competencia con alimentos:** Una de las grandes ventajas de la biomasa forestal es que esta por fuera de la discusión de competencia con alimentos.

3.2.2.1.2. Aspectos limitantes

- **Dispersión y logística:** A pesar de que la producción es de carácter comercial, las plantaciones están dispersas por la región, por lo que el aprovechamiento de los residuos que se quedan en el campo puede ser dispendiosa y costosa.
- **Volumen:** El volumen de producción de residuos forestales es importante, sin embargo, pareciera que no es suficiente para el establecimiento de una planta dedicada a la producción de SAF con esta materia prima. Es importante considerar esta disponibilidad como un complemento para otras biomásas que habiliten tener mayores escalas de producción y por ende una mayor competitividad.
- **Costos de pretratamiento:** Al igual que otras biomásas, los residuos forestales también pueden requerir pretratamientos para su aprovechamiento. Esto puede incluir procesos de secado, reducción de tamaño, acondicionamiento para el transporte, entre otros.
- **Disponibilidad de información:** La información pública es muy limitada. Se requiere mayor cantidad de información para poder establecer con mayor facilidad la factibilidad de proyectos que utilicen esa biomasa.

3.3. Residuos de otros cultivos agrícolas en el Valle del Cauca

Además de la agroindustria de la caña de azúcar y el sector forestal, el Valle del Cauca dispone de la producción de otros cultivos que generan residuos lignocelulósicos. Aunque su volumen individual sea menor en comparación con la caña de azúcar, su análisis es relevante para obtener una visión completa de la disponibilidad de biomasa en el departamento, ya que eventualmente pueden constituir recursos complementarios en el aprovechamiento de alguna biomasa específica.

3.3.1. Cuantificación

En los estudios analizados se ha descartado el uso de otras biomásas agrícolas para su aprovechamiento energético, principalmente por su menor volumen y alta dispersión.

El documento que hace alguna referencia específica al Valle del Cauca es el Atlas de Biomasa Residual (UPME, 2009) del cual se extrae la información para elaborar la Tabla 9:

Tabla 9: Producción de residuos agrícolas en el Valle del Cauca (2008)

Cultivo	Área Sembrada (ha)	Producción (t producto/año)	Cantidad de Residuo (t/año)	Tabla de Origen (Anexo E)	Factor*
Arroz	5.970	40.031	102.079	Tabla 21	2,55
Banano	6.202	65.015	399.844	Tabla 22	6,15
Café	72.563	63.523	340.509	Tabla 23	5,36
Caña de Panela	6.216	35.228	221.234	Tabla 25	6,28
Maíz	31.568	157.831	223.472	Tabla 26	1,42
Plátano	18.630	147.073	904.497	Tabla 28	6,15
Total	141.149	508.701	2.191.635		

*Calculado con base en el volumen del producto principal y la cantidad de residuos generados.

Fuente: UPME, 2009. Anexo E.

Este volumen de residuos de los demás cultivos que existen en el departamento del Valle hay que utilizarlo con precaución. El Atlas los define como una cantidad total de residuo generado, pero no discrimina cual es la biomasa que lo conforma, es decir, incluye todo (hojas, tallos, etc.). Esto también implica que no necesariamente toda la cantidad de residuos es lignocelulósica o fácilmente aprovechable para los fines energéticos y de SAF. De igual manera, no contempla que la producción de varios de los cultivos analizados se realiza en pequeñas parcelas y no necesariamente obedecen a una producción industrial.

Ahora bien, en un ejercicio de actualización de los volúmenes de producción de residuos, se calculó la columna “Factor” de la Tabla 9. Este factor corresponde al cociente entre la cantidad de residuos reportada por el Atlas y el volumen del producto principal obtenido del cultivo. Con base en lo anterior, se realiza una actualización de los residuos tomando como referencia la producción de 2023 que publica el Ministerio

de Agricultura en Agronet⁵, con el objetivo de tener un orden de magnitud de la evolución del volumen de residuos agrícolas de la región.

Tabla 10: Estimación de la producción de residuos agrícolas en el Valle - 2023.

Cultivo	Producción (t producto / año)		Factor	Cantidad de Residuo (t/año)
	2009	2023		
Arroz	35.333	18.779	2,55	47.886
Banano	76.266	91.704	6,15	563.981
Café	62.711	37.411	5,36	200.537
Caña de Panela	36.849	29.258	6,28	183.740
Maíz	143.975	80.058	1,42	113.353
Plátano	158.178	337.616	6,15	2.076.334
Total	513.312	594.825		3.185.832

Fuente: Agronet, cálculos propios.

Con base en los resultados de la Tabla 10 se observa que ha habido un incremento en la producción de residuos en el departamento del orden de 994 mil toneladas entre 2009 y 2023. Esto representa un crecimiento de 45% durante los 14 años analizados.

Al analizar por cultivos, se encuentra que ha habido una reducción en la producción en 4 de los 6 analizados y un incremento en los dos restantes. Se destaca el comportamiento del plátano, que aumentó a más de 2 millones de toneladas el potencial de producción de residuos, por lo que se vuelve un cultivo de interés para estudios posteriores que profundicen sobre el particular.

3.3.2. Aspectos habilitantes

- **Diversificación:** Son una fuente de biomasa que hasta el momento no se ha utilizado para fines energéticos. Si bien su volumen no es tan alto como las de la caña o los forestales, si pudieran eventualmente complementar la oferta para ampliar proyectos, en la medida que se desarrollen sistemas de recolección eficientes.
- **Composición Lignocelulósica:** En principio tienen una composición de lignocelulosa que se puede aprovechar en las rutas de conversión para SAF.

⁵ <https://www.agronet.gov.co/>

3.3.3. Aspectos limitantes

- **Dispersión:** Muchos de estos residuos (ej. zoca de café, rastrojo de maíz) están muy dispersos geográficamente y se realizan en explotaciones pequeñas, lo que dificulta y encarece su recolección, consolidación y transporte.
- **Volumen Comparativo menor:** Su volumen individual suele ser mucho menor que el de los residuos de caña en el Valle.
- **Usos Actuales:** Algunos pueden tener usos locales (ej. alimento animal, compostaje), los cuales es necesario precisar para determinar el costo de oportunidad.
- **Costos Logísticos:** Las escalas son importantes para reducir costos y aumentar eficiencias. El menor volumen de biomasa residual de estos cultivos supone que la logística puede ser costosa.

4. ANÁLISIS DE DISPONIBILIDAD DE ETANOL DE PRIMERA GENERACIÓN EN EL VALLE DEL CAUCA COMO MATERIA PRIMA PARA SAF (RUTA ALCOHOL TO JET - ATJ)

En esta sección se analizará cual es la capacidad actual de producción de alcohol de primera generación que existe en la región, que tanta disponibilidad existe para atender un requerimiento adicional como el de la producción de SAF y cuáles son sus aspectos habilitantes y limitantes.

4.1. Disponibilidad Actual

En Colombia la capacidad de producción de alcohol está determinada principalmente por la industria de biocombustibles y por lo tanto el producto es destinado para atender el mercado de alcohol carburante, el cual oxigena las gasolinas del país.

Si bien existen algunas otras destilerías mucho más pequeñas, estas no se encuentran operando o lo hacen muy esporádicamente para atender requerimientos del mercado de licores, principalmente.

El programa de biocombustibles y específicamente el de oxigenación de la gasolina en Colombia está determinado por la Ley 693 de 2001. Los objetivos principales de esta Ley se establecieron para promover el saneamiento ambiental, la seguridad energética y el desarrollo del empleo industrial y rural.

Con base en lo anterior se construyeron las destilerías que actualmente funcionan en el país y se listan a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 11: Destilerías de alcohol carburante de Colombia

Ingenio	Departamento	Año de inicio de operación	Capacidad Nominal Inicial (miles l/día)	Capacidad Nominal ampliada (actual) (miles l/día)
Incauca	Cauca	2005	300	350
Providencia	Valle	2005	250	300
Mayagüez	Valle	2006	150	250
Risaralda	Risaralda	2006	100	
Manuelita	Valle	2006	250	
Riopaila	Valle	2015	400	
Bioenergy	Meta	2018	500	

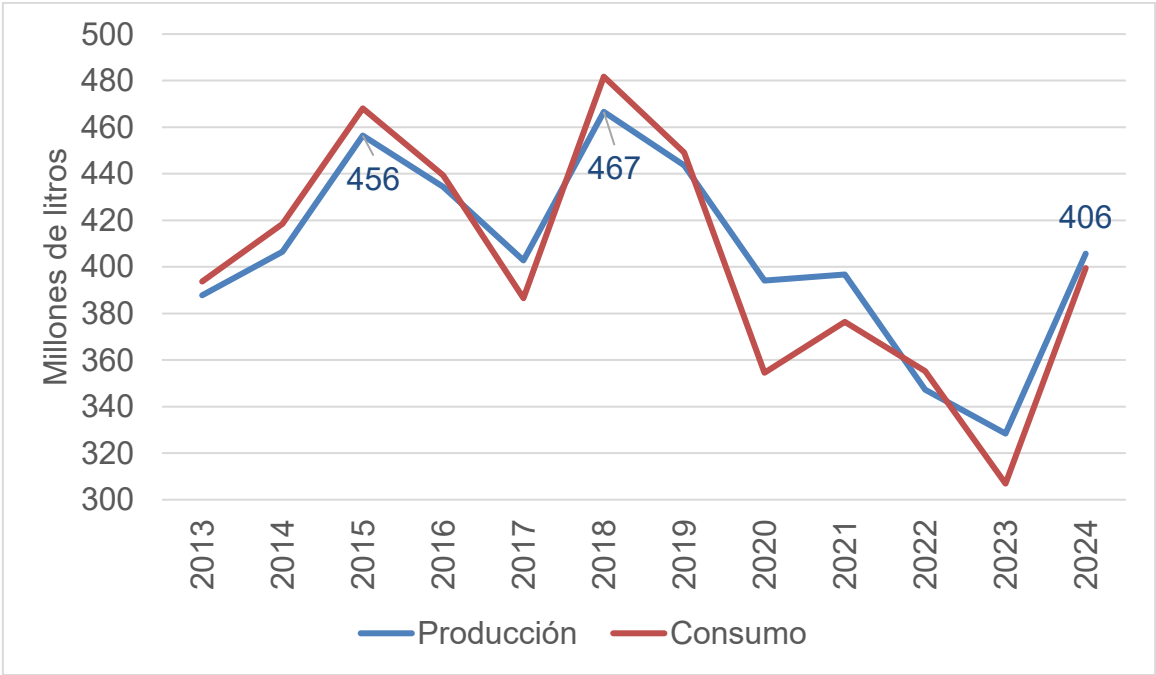
Fuente: Elaboración propia.

Con base en lo anterior se tiene que el país cuenta con una capacidad nominal de producción de alcohol carburante de 2.150.000 litros por día. Todas las destilerías utilizan caña de azúcar como materia prima principal para la producción.

En el **Gráfico 4** se observa la evolución de la producción y las ventas de las destilerías colombianas. De un lado, se puede apreciar como las ventas van en concordancia con la producción. Esto obedece a que la capacidad de almacenamiento del producto es muy limitada y por lo tanto se debe ajustar la producción. De otro lado se puede también evidenciar como la producción y las ventas han tenido una tendencia a la baja a pesar de que entraron en operación la destilería de Riopaila en 2015 y la de Bioenergy en 2018.

Al momento de escribir este informe, no se conoce ningún proyecto de construcción de alguna nueva destilería ni de ampliación de alguna de las existentes, así que las proyecciones de producción que puedan hacerse deben estar basadas en la utilización de la capacidad instalada actual.

Gráfico 4: Producción y ventas de alcohol carburante de las destilerías colombianas



Fuente: Asocaña

4.2. Potencial de Excedentes o Redireccionamiento para Producción de SAF

Como se anotó anteriormente, la producción de alcohol de las destilerías colombianas presentó una tendencia decreciente durante 5 años en el periodo 2018 – 2023, pasando de 467 a 328 millones de litros, respectivamente. En el año 2024 se registró

un incremento y la producción llegó a 400 millones de litros, el mejor resultado de los últimos 5 años, pero aun un 13% por debajo del mejor registro de producción del sector.

Esto permite considerar que la industria colombiana aún tiene capacidad de producir mayores volúmenes de alcohol de los que actualmente tiene. Esto es posible mediante una mayor utilización de la capacidad instalada.

Para poder proyectar el volumen de producción potencial, es necesario conocer los días efectivos de operación de cada una de las destilerías. Para el caso de las que están ubicadas en el valle del río Cauca, se considera que pueden operar entre 305 y 320 días al año, mientras que la destilería de Bioenergy tiene un esquema de producción de zafra (periodo de cosecha), la cual tiene una duración aproximada de 180 días.

Con base en esta información y con las capacidades de producción de las plantas presentadas en la Tabla 11, se puede inferir que las destilerías podrían tener una capacidad de producción que podría oscilar entre 593 y 618 millones de litros al año. Esto supone condiciones ideales de producción para poder mantener la capacidad instalada en su máxima ocupación.

El promedio de producción de las destilerías entre 2018 y 2024 fue de 398 millones de litros anuales, un valor muy cercano al registrado en 2024. Con base en ello, se podría considerar que la industria colombiana podría abastecer de etanol anhidro a una planta de producción de SAF con un volumen que estaría entre 220 y 195 millones de litros anuales, sin desatender el mercado de alcohol carburante.

Ahora bien, estos valores consideran condiciones ideales de producción, mercados y logística. Para ser conservadores y garantizar un suministro constante, es recomendable considerar que se pueden **obtener al menos 150 millones de litros anuales para una planta de producción de SAF.**

4.3. Competitividad del Etanol como Insumo para SAF

Generalmente el enfoque de competitividad de los productos para los diferentes mercados se aborda con la comparación del precio de venta y los costos de producción. Sin embargo, para el caso de la producción actual de etanol del valle del río Cauca esta aproximación no es aplicable, en la medida que tanto el etanol como su materia prima, tienen unos costos de oportunidad claramente definidos.

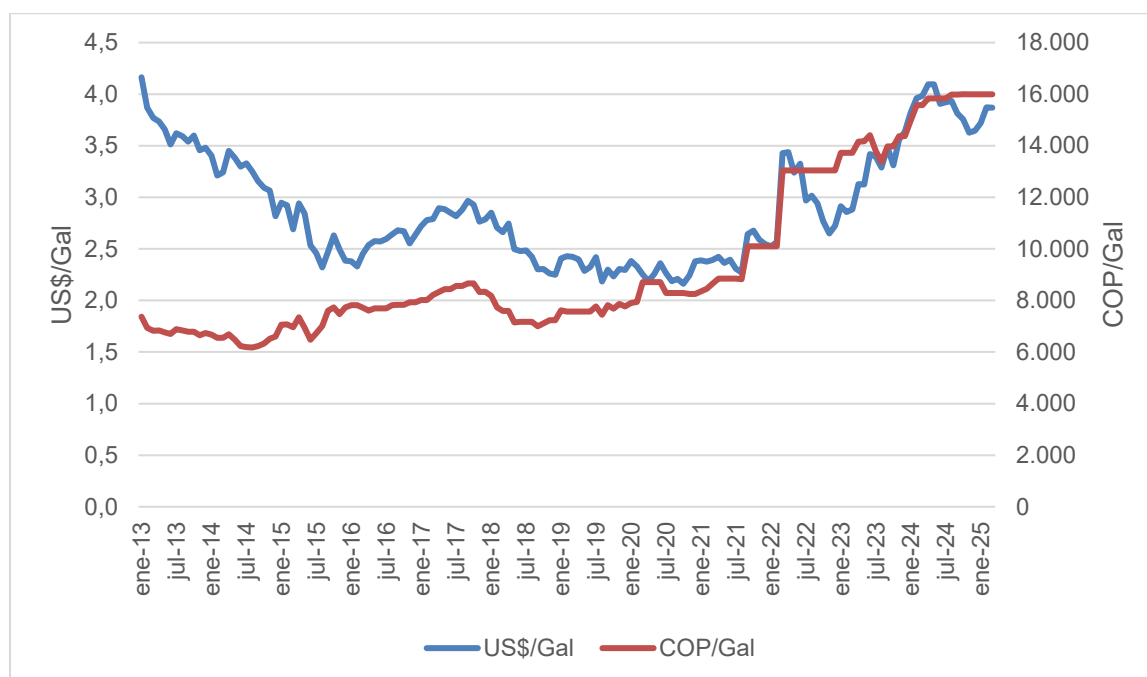
Para el caso del etanol, como se mencionó anteriormente, las destilerías abastecen parte del mercado de alcohol carburante que requiere el país para dar cumplimiento al programa de oxigenación definido por la Ley 693 de 2001.

Este mercado está regido por una mezcla obligatoria que define el Ministerio de Minas y Energía, la cual actualmente se encuentra en 10%. El precio del alcohol carburante está determinado por una fórmula compuesta por tres componentes:

1. **Precio fijo:** Establecido inicialmente en 2003 con base en un modelo de costos de producción. Posteriormente, fue ajustado e indexado en un 70% de la variación del Índice de Precios al Productor (IPP) y en un 30% de la variación de la Tasa Representativa del Mercado (TRM) de cada año.
2. **Precio con referencia al azúcar:** Este componente considera el costo de oportunidad incurrido por el ingenio al destinar caña a la producción del alcohol en lugar de azúcar. Para ello, se utiliza la referencia del precio del azúcar blanco de exportación para la valoración de la materia prima del alcohol calculando el promedio móvil de 6 meses. Este valor se convierte en términos de alcohol, se le adicionan los costos de elaboración del alcohol y se hacen ajustes por costos no incurridos que si incorpora el precio del azúcar y adicionalmente se descuenta el uso de la vinaza como sustituto de la fertilización tradicional. Esto significa que no es una equivalencia de alcohol en términos de azúcar, sino un valor que toma como referencia el azúcar para realizar las operaciones.
3. **Precio con referencia a la gasolina:** Como en el caso de la formula anterior, se toma la gasolina que se sustituye como referencia para la valoración del alcohol. En este caso se considera el precio de paridad de exportación de la gasolina al golfo de México. Este valor se ajusta por el menor poder calorífico de la mezcla con etanol, se incrementa por el mayor octanaje del alcohol frente a la gasolina y se aplica una prima por no contener azufre. Los últimos dos ajustes se hacen con base en referencias de mercado.

Una vez calculadas estas tres referencias, se escoge la más alta. Esta se compara con el precio de la gasolina en Bogotá. En caso de que la referencia del alcohol sea superior, se acota a esta nueva referencia. Si es inferior, se aplica el valor resultante de la fórmula. En el Gráfico 5 se presenta la evolución del precio regulado en Colombia tanto en Pesos colombianos como en Dólares de Estados Unidos.

Gráfico 5: Precio regulado del alcohol carburante en Colombia 2013-2025 (US\$/Gal y COP\$/Gal)



Fuente: Asocaña, cálculos propios.

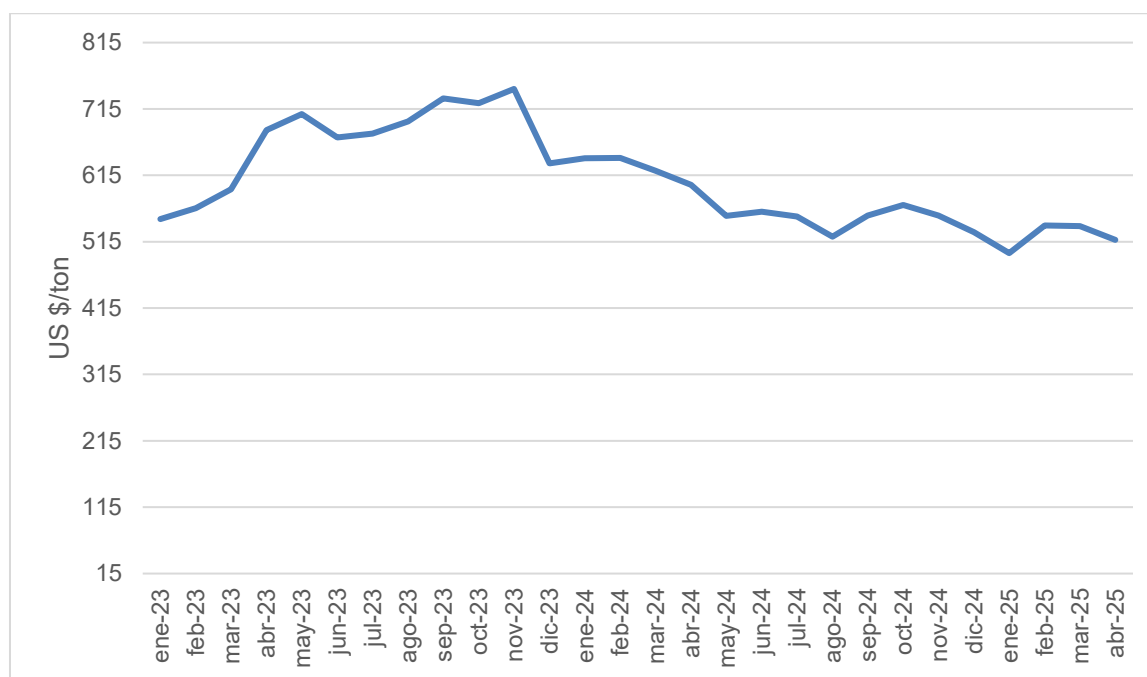
Esta condición del mercado determina que el volumen que pueda aportar la industria colombiana de alcohol para una planta de SAF sea adicional a lo que actualmente se destina para el mercado de alcohol carburante, ya que los volúmenes que no puedan ser colocados en ese mercado, tendrán un costo de oportunidad distinto.

Este costo de oportunidad está determinado por el ingreso que puede generar la materia prima en el mercado del azúcar, ya que en caso de que la materia prima no se vaya a utilizar en la destilería, esta deberá ser utilizada en la elaboración de azúcar, la cual debe ser destinada al mercado de exportación, en la medida que el mercado interno Colombiano está suficientemente abastecido.

De acuerdo con Asocaña⁶ el 12% de la producción de azúcar fue azúcar crudo, por lo que el restante 88% fue azúcar blanco, blanco especial y refinados. Una situación similar ocurre en las exportaciones de azúcar, donde el 75% corresponde a exportaciones de azúcares blancos.

⁶ Informe Anual 2023 - 2024

Gráfico 6: Precio internacional del azúcar refinado



Fuente: Asocaña.

De esta manera hay que evaluar el costo de oportunidad de los productores de alcohol para poder habilitar la producción adicional de alcohol que la planta de SAF requiere.

4.4. Aspectos Limitantes y Habilitantes

4.4.1. Aspectos Habilitantes

- **Industria consolidada:** Existe una infraestructura de producción de etanol a partir de caña de azúcar bien establecida y operativa en los ingenios de la región.
- **Materia prima:** La cadena de suministro de la materia prima principal (caña de azúcar) está desarrollada y es eficiente en todos sus procesos.
- **Potencial Tecnológico de la Ruta Alcohol to Jet (ATJ):** La tecnología ATJ es una de las rutas aprobadas por ASTM para la producción de SAF y se encuentra en una coyuntura donde próximamente comenzará su escala comercial.
- **Sinergias con la Agroindustria Existente:** El establecimiento de una planta de producción de SAF contigua a un ingenio azucarero es atractivo ya que se contaría con servicios como vapor, energía eléctrica de cogeneración y el

mismo alcohol. Igualmente se puede explorar la utilización de otros productos como el CO₂, vinazas o biogás.

- **Proximidad a Potenciales Puntos de Consumo:** En el Valle está el aeropuerto internacional como el Alfonso Bonilla Aragón, lo cual podría facilitar la logística y reducir costos de distribución del SAF.

4.4.2. Aspectos Limitantes

- **Competencia con el Mercado de Alcohol Carburante:** Actualmente la producción de alcohol está destinada para atender el programa de oxigenación de la gasolina. Atender un mercado adicional como el de la producción de SAF requerirá la producción de más alcohol aprovechando la capacidad instalada y la materia prima actual.
- **Costo de oportunidad:** Tanto el alcohol que hoy se produce como la materia prima utilizada tienen costos de oportunidad muy claros.
- **Necesidad de Políticas Específicas de Apoyo para SAF:** Para habilitar las inversiones es necesario tener mayor claridad en el marco regulatorio del SAF en Colombia. Se requieren incentivos fiscales para mejorar la competitividad de la producción y señales de la existencia de un mercado en firme.
- **Disponibilidad de Hidrógeno:** Actualmente no hay disponibilidad de hidrógeno verde en la región. Esto implica que la planta de SAF debe autoabastecerse, incrementando el costo de la inversión.
- **Logística y Almacenamiento Específico para SAF:** Esta por desarrollar, lo cual requiere claridad en las especificaciones para poder determinar las inversiones.

5. FACTORES CLAVE QUE AFECTAN LA DISPONIBILIDAD REAL DE BIOMASA LIGNOCELULÓSICA PARA SAF EN EL VALLE DEL CAUCA

Como se ha podido observar a lo largo del presente documento, la existencia de grandes volúmenes de biomasa residual lignocelulósica y de una industria productora de etanol consolidada, no garantiza que esté disponible para el aprovechamiento en la producción de SAF. Existen diversos aspectos que hay que considerar para determinar la cantidad efectivamente aprovechable, los cuales se analizan a continuación.

5.1. Logística de Recolección y Procesamiento

5.1.1. RAC de caña de azúcar

En primera instancia hay que considerar que el RAC de caña más fácilmente aprovechable está determinado por la cosecha mecanizada, en la medida que la máquina al trozar la caña está realizando un primer proceso de pretratamiento al densificar el material y dejarlo semi picado. De igual manera, mediante este tipo de cosecha es más fácil realizar un proceso de hileración para su posterior recolección. Los estudios analizados y el estudio de con el estudio de Vásquez & Vidal coinciden en la necesidad de densificar el RAC para facilitar las condiciones de manejo y aumentar su eficiencia, dada su dispersión a lo largo de toda la región.

Esta situación hace necesario que se deba tomar alguna alternativa de densificación para poder hacer más eficiente su recolección y transporte.

De acuerdo con Vásquez & Vidal (2022)⁷, tres rutas principales para el tratamiento y densificación del RAC son:

1. **Enfardado:** Después de la cosecha mecánica el RAC se deja secar en el campo para reducir su humedad. Luego una máquina enfardadora lo comprime en grandes pacas rectangulares, llamadas fardos, las cuales son recolectadas y cargadas en camiones. Una vez transportados a la planta se desenfardan, tamizan y trituran para su posterior uso o almacenamiento.
2. **Máquina picadora forrajera:** Se hace el mismo proceso inicial que en el enfardado. En vez de enfardar, una máquina picadora forrajera recolecta el RAC seco, lo tritura en el campo y lo deposita directamente en los vagones de los camiones. Este material se lleva a la planta para un nuevo picado, tamizado para dejarlo en condiciones de almacenamiento.

⁷ 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.

3. **Cosecha integral:** La cosechadora mecánica es la encargada de recolectar tanto los tallos trozados como una parte del residuo que se genera para ser cargados en el camión de transporte. En el ingenio, se realiza el proceso de separación de los tallos y del RAC utilizando ventiladores. El RAC ya separado se tamiza, tritura y almacena.

En el mismo estudio se presentan los costos de cada una de las alternativas, incluyendo el transporte hasta la planta y se llega al siguiente resultado:

Tabla 12: Costo de densificación del RAC (\$/ton RAC)

Ruta	Determinístico	Simulación ⁸
Fardos	19.125	20.416
Máquina picadora	20.078	21.762
Cosecha integral	7.867	8.977

Fuente: Vásquez & Vidal, 2022

De acuerdo con la conclusión del estudio, la mejor alternativa para la recolección del RAC es la vía de la cosecha integral, dado su significativo menor costo, frente a las otras alternativas analizadas.

Esto implica también que se requiere infraestructura asociada al método de recolección que escoja cada ingenio, ya que actualmente los residuos permanecen en campo y no se están transportando masivamente fuera de él. El estudio de Vásquez & Vidal da una idea de las implicaciones del transporte. Es necesario entonces profundizar más al respecto y concretar las zonas de recolección junto con la ubicación de la planta que hará el beneficio de esta biomasa.

Actualmente en el Sector Azucarero ya se está viendo la implementación de algunas de estas prácticas, pero no se tiene información detallada al respecto. De acuerdo con la información recibida de Cenicaña, se tiene conocimiento que durante 2024 un ingenio enfardó y transportó a la planta 34.900 toneladas de RAC para ser usado en la caldera.

5.1.2. Bagazo

El bagazo tiene una ventaja muy importante sobre otras biomásas. De un lado, es un residuo procedente de la producción industrial, lo que lo deja concentrado ya en las plantas productoras. Esto significa que no es necesario recogerlo del campo y que en general su logística es mínima.

Como se anotó anteriormente, parte del bagazo se comercializa para la producción de papel, por lo que se tiene ya una experiencia y claridad en los métodos de

⁸ Simulación de Montecarlo

transporte si se requiere realizar su consolidación en un punto diferente del de su generación.

5.1.3. Vinazas

En cuanto a la logística de las vinazas, esta puede ser compleja, dado que su composición es principalmente agua. Esta condición implica que los volúmenes son altos y que su aprovechamiento sea viable principalmente en el punto de generación o en sus cercanías, como se deduce del estudio elaborado por el Consorcio Biocombustibles de Colombia en 2023.

5.1.4. Residuos forestales

De manera similar a lo que ocurre con el RAC de caña de azúcar, los residuos forestales correspondientes a ramas y copas se encuentran dispersos. Actualmente no se tiene más información sobre su aprovechamiento y la logística que se está empleando para ello.

En cuando los residuos que se obtienen del beneficio de la madera como cortezas y aserrines, de manera análoga al bagazo, ya se encuentran concentrados. Estos son aprovechables y actualmente ya se conocen de proyectos para su aprovechamiento energético, como el desarrollado por Smurfit Westrock con la instalación de una caldera apta para su utilización con distintas biomásas. De acuerdo con declaraciones de los directivos de la empresa, esta caldera comenzará su operación en el transcurso del año, requirió una inversión superior a los US\$120 millones y podrá utilizar corteza, ramas y lodos industriales⁹.

Finalmente, es necesario contar con una adecuada infraestructura y equipos que permitan la recolección y el transporte de dichos residuos para su aprovechamiento.

5.1.5. Etanol de primera generación

Para el caso del etanol ya hay una industria con más de 20 años de experiencia que tiene resueltos la mayoría de los retos. La producción y el almacenamiento del producto cuentan con los mejores estándares. El principal aspecto logístico para un proyecto de producción de SAF corresponde al transporte del alcohol desde las

⁹ <https://forbes.co/2025/05/09/eventos-forbes/asi-la-sostenibilidad-se-convirtio-en-el-motor-del-negocio-de-smurfit-westrock-desde-el-valle-del-cauca>

destilerías que lo provean hasta la planta. Esto no es muy distinto a lo que se hace hoy en día con la producción de alcohol carburante.

5.2. Usos Actuales y Competencia por la Biomasa en el Valle del Cauca

5.2.1. RAC de caña de azúcar

Esta es una biomasa que ha sido utilizada tradicionalmente en el suelo como fuente de materia orgánica. Por eso existen grandes prevenciones en retirarla. Sin embargo, la información disponible de experiencias en Brasil muestra que es viable retirar una parte sin afectar la materia orgánica del suelo. La cantidad para dejar y a retirar dependerá de los estudios puntuales que se realicen para cada suerte.

Como se anotó anteriormente, en el estudio de la Universidad Nacional de Palmira toman como referencia mantener en el suelo el 50% de los residuos de la cosecha mecanizada.

5.2.2. Bagazo

El principal uso del bagazo corresponde al de combustible para las calderas de cogeneración. El desarrollo de la industria ha llevado a que se consigan eficiencias en la generación y uso de la energía. La producción de azúcar y de alcohol es altamente demandante de energía térmica y eléctrica. En la actualidad se generan excedentes de energía eléctrica que son vendidos a la red. Esto implica entonces que el costo de oportunidad estaría determinado por el ingreso que generan las ventas de energía eléctrica. Si hay un desvío de bagazo hacia otra actividad, debería la menos cubrir el ingreso que se obtenía mediante las ventas de energía a la red. Esta es la principal limitación que se encuentra al momento de plantear proyectos que utilicen el bagazo como materia prima.

Una alternativa para poder obtener el bagazo es la sustitución del combustible en las calderas del ingenio. Es importante que esta sustitución también sea de baja huella de carbono, ya que la industria está en un proceso de descarbonización muy importante. De esta manera, una alternativa podría ser la de utilización de RAC en vez de bagazo, para el bagazo utilizarlo para la producción de SAF. Sin embargo, los retos del RAC ya se han discutido y por lo tanto habría que analizar en mayor detalle esta alternativa.

5.2.3. Vinazas

Las vinazas subproducto de la producción de alcohol carburante son utilizadas para la elaboración de compost y de fertilizantes, mediante los cuales se ha reemplazado parcialmente el uso de fertilizantes químicos como el cloruro de potasio.

Dependiendo del uso que se le de a este subproducto, se puede competir con el uso actual. En el caso de la producción de biogás o biometano, el subproducto de la digestión anaerobia conserva los minerales presentes en el digestato, por lo que su uso para este fin no competiría con el uso actual.

5.2.4. Residuos forestales

Si bien los estudios analizados no detallan exhaustivamente todos los usos competitivos específicos de los residuos forestales para el departamento, se pueden inferir varias alternativas:

- **Autoconsumo como energético:** Es común que los aserraderos y otras plantas de transformación de madera utilicen sus propios residuos (aserrín, costaneras, corteza) como combustible para calderas, secadores u otros procesos que requieren energía térmica. Este uso representa una competencia directa, ya que el residuo ya está siendo utilizado para reducir costos de la operación de la empresa.
- **Venta:** Especialmente aquellos residuos de mayor calidad o más fáciles de manejar (ej. astillas, recortes limpios), pueden ser comercializados para industrias como la fabricación de tableros aglomerados o para la generación de energía en otras instalaciones.
- **Producción de Carbón Vegetal o Leña:** A menor escala, algunos residuos forestales pueden destinarse a la producción de carbón vegetal o ser utilizados como leña por comunidades o pequeñas industrias.
- **Materia orgánica en campo:** Una porción significativa de los residuos del aprovechamiento forestal (ramas, copas, hojas) tradicionalmente se deja en el sitio de la cosecha. Si bien esto puede contribuir a la materia orgánica del suelo, su no recolección también implica una pérdida de biomasa con potencial energético. La decisión de recolectarlos para SAF competiría con la práctica de dejarlos en sitio y con los costos asociados a su extracción.

El estudio de la Universidad Nacional de Palmira (2016), al analizar el sector forestal, se enfoca más en la cuantificación del residuo generado que en un análisis detallado de sus usos competitivos actuales. Sin embargo, al establecer factores de producción de residuos por componente (corteza, foliar, ramas), implícitamente reconoce que no toda la biomasa del árbol se convierte en producto principal. El estudio del Consorcio

Biocombustibles de Colombia, al considerar la biomasa lignocelulósica para Biojet-FT, incluye la "Viruta Forestal" con un factor de disponibilidad del 20% (Tabla 12, Producto 3), lo que sugiere que el 80% restante ya tiene otros destinos o no es fácilmente recuperable.

Por lo tanto, la competencia por los residuos forestales en el Valle del Cauca existe principalmente con su uso energético interno en la propia industria maderera y, potencialmente, con la industria de tableros o pulpa. La viabilidad de destinar estos residuos a una planta de SAF dependerá de su costo de adquisición frente a estos usos alternativos y de la capacidad para movilizar los residuos que actualmente no se aprovechan (como los dejados en campo), superando los desafíos logísticos y económicos de su recolección.

5.2.5. Etanol de primera generación

El principal uso del alcohol que se produce en la región corresponde al de alcohol carburante para ser utilizado en el cumplimiento del mandato del programa de oxigenación de los combustibles.

Como se anotó anteriormente en página 27 (Competitividad del Etanol como Insumo para SAF), existe tanto la demanda como los precios de referencia para este mercado. En enfoque que viabiliza la oferta de etanol de primera generación producido en el país corresponde a una producción incremental que aumente la utilización de la capacidad instalada, de manera que no se afecte la oferta para el programa de oxigenación y que viabilice las destilerías mediante una mayor ocupación de su infraestructura.

Otros usos potenciales corresponden a la sustitución de las importaciones de alcohol para el mercado de alcohol industrial o incluso la exportación hacia otros países. Esto corresponde a un potencial, sin embargo, está supeditado a que las condiciones de mercado sean favorables para su materialización.

5.3. Consideraciones económicas y de sostenibilidad

La disponibilidad de biomasa residual y etanol del Valle del Cauca para la producción de Combustible Sostenible de Aviación (SAF) se basa en su cuantificación y en factores técnicos y logísticos, así como en consideraciones económicas y de sostenibilidad a nivel local. Estas dimensiones son esenciales para evaluar la viabilidad a largo plazo de cualquier proyecto de SAF en la región.

Dentro de las consideraciones de carácter económico se tiene que:

- **Costo de oportunidad de las materias primas:** Como se ha analizado anteriormente, las diferentes materias primas tienen costos de oportunidad que dependen de las diferentes posibilidades reales de utilización para otros fines. De esta manera se tiene que el bagazo se utiliza como energético en el ingenio, para generar excedentes de energía exportables a la red y como fuente de fibra para la elaboración de papel. El alcohol de primera generación ya tiene un mercado claro y definido para la oxigenación de las gasolinas. Los que tienen potenciales usos y que están en proceso de definición son el RAC y las vinazas, que, si bien hoy tienen un uso, su costo de oportunidad no tiene una referencia tan clara como en el caso de los dos productos anteriores.
- **Inversiones para logística y pretratamientos:** El aprovechamiento de RAC y residuos forestales requieren de inversiones para superar la condición de dispersión en la que se encuentran. De igual manera, hay que implementar pretratamientos para adecuarlas a los usos requeridos, uno de ellos es el proceso de densificación para reducir el impacto del transporte en el costo y huella de carbono de esta biomasa.
- **Competitividad del SAF:** El precio resultante del producto debe ser competitivo frente a las alternativas renovables del mercado. Es necesario que se implementen programas y estímulos tributarios para todos los eslabones de la cadena involucrados.

Sobre las consideraciones en materia de sostenibilidad se tienen las siguientes:

- **Uso del suelo y prácticas agrícolas:** El aprovechamiento del RAC debe ser realizado de manera sostenible, de manera que se asegure una reposición permanente de la materia orgánica en el suelo. Es necesario entonces que se estudie más al detalle los requerimientos del suelo y cuantificar el volumen de residuos que debe quedar en el suelo, de manera que se pueda aprovechar el máximo potencial sin afectar la sostenibilidad.
- **Huella de carbono:** La huella de carbono es importante controlarla a lo largo de toda la cadena productiva y de distribución. Es por esto por lo que las mejores prácticas deben también estar presentes en la recolección, transporte, pretratamiento y conversión de la materia prima, de manera que sea mínima.
- **Gestión de residuos:** La planta de SAF generará sus propios efluentes y subproductos. Es necesario que se dé el adecuado manejo y se logren valorizaciones en lo posible.

6. SÍNTESIS Y PRIORIZACIÓN: LA BIOMASA MÁS ABUNDANTE Y MAYORMENTE DISPONIBLE EN EL VALLE DEL CAUCA PARA SAF.

Tras el análisis detallado de las diversas fuentes de biomasa residual y la producción de bioetanol de primera generación en el departamento del Valle del Cauca, basado en el "Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia", el estudio "Cuantificación, caracterización y georreferenciación de la biomasa residual para aprovechamiento energético en el Valle Geográfico del Río Cauca" y el "Estudio técnico integral para caracterizar las tecnologías de biocombustibles de segunda y tercera generación", es posible realizar una síntesis que permita priorizar las materias primas con mayor potencial para el establecimiento de una planta de Combustible Sostenible de Aviación (SAF).

6.1. Consolidación de la Abundancia de Biomasa Lignocelulósica y Etanol en el Departamento

El Valle del Cauca y la región en general se caracterizan por tener una gran cantidad de biomasa resultado de su producción agroindustrial.

- **Residuos de la agroindustria de la caña:** Como se ha mencionado anteriormente, esta agroindustria tiene 3 residuos principales que tienen potencial de aprovechamiento:
 - **RAC:** De acuerdo con los cálculos realizados, en la **Tabla 8** se muestra como el Valle del Cauca tiene un potencial de producción de RAC de 1,5 millones de toneladas anuales. Esto ya incorpora el efecto de la cosecha mecanizada y el mantenimiento del 50% del RAC en el campo para la preservación del suelo.
 - **Bagazo:** De acuerdo con las últimas cifras reportadas por Cenicaña, en el departamento del Valle se produjeron 4,7 millones de toneladas de bagazo, según se deduce de la información de la **Tabla 7**.
 - **Vinazas:** Corresponden al subproducto de la producción de alcohol. El promedio de producción de alcohol de los últimos 6 años fue de 398 millones de litros, por lo que se producen cerca de 4.378 millones de litros de vinaza diluida, considerando la proporción reportada en el estudio del Consorcio Biocombustibles de Colombia.
- **Residuos forestales:** El estudio "Cuantificación, caracterización y georreferenciación de la biomasa residual para aprovechamiento energético en el Valle Geográfico del Río Cauca" destacó al Valle del Cauca con 30.112,4 hectáreas de plantaciones forestales y estimó una generación de biomasa

residual forestal de 52.055 toneladas en 2015 para toda su zona de estudio (incluyendo Norte del Cauca y Sur de Risaralda).

- **Alcohol de primera generación:** El suroccidente es la región donde se concentra la mayor parte de la producción de Colombia. Durante los últimos 6 años se produjeron en promedio 398 millones de litros anuales. Como se observa en el **Gráfico 4**, el mayor volumen de producción se alcanzó en 2018, cuando se produjeron 467 millones de litros. La capacidad instalada actual tiene un potencial de producción de 600 millones de litros anuales, si se utilizara a plena capacidad.
- **Otros residuos agrícolas lignocelulósicos:** De acuerdo con el “Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia”, en otros cultivos en el departamento del Valle existe un potencial de 3,2 millones de toneladas de residuos al año, tal como se observa en la Tabla 10. Es de enfatizar que estos se encuentran en mayor dispersión y son de menor volumen individual, lo que los vuelve fuentes marginales para una planta de SAF a gran escala.

6.2. Evaluación de la Disponibilidad Real para SAF en el Valle del Cauca

La disponibilidad hay que acotarla de acuerdo con los factores críticos que limitan los aprovechamientos. Los factores de uso actual, logística y viabilidad técnica son cruciales:

- **RAC de caña de azúcar:** Es la biomasa más abundante. La necesidad de mantener la materia orgánica en el suelo y los desafíos para su recolección limitan su potencial. A pesar de ello podría haber potencialmente 1,5 millones de toneladas anuales. Para precisar la disponibilidad hay que determinar la ubicación de la planta de SAF y seleccionar las fuentes más cercanas que minimicen los costos logísticos.
- **Bagazo:** Es una biomasa abundante e ideal para la producción de SAF en la ruta ATJ. Su uso para la cogeneración y la producción de papel limitan su disponibilidad. Existe la posibilidad de su utilización para SAF en la medida que se pueda sustituir su uso energético en el ingenio con otras biomásas (RAC u otros cultivos). Recientemente la empresa Carvajal Pulpa y Papel cerró su planta de producción de papel ubicada en Yumbo¹⁰. De acuerdo con conversaciones con expertos de la industria, el consumo de bagazo de esta planta era superior a las 200 mil toneladas anuales, por lo que este volumen podría encontrar un nuevo uso para la producción de SAF.

¹⁰ <https://www.larepublica.co/empresas/carvajal-cerro-planta-de-propal-en-yumbo-por-aumento-de-la-competencia-con-china-4109163>

- **Vinazas:** Su conversión a biogás/biometano es la ruta de valorización energética más directa. Su contribución a SAF sería indirecta, al aumentar el portafolio de energéticos del ingenio y lograr reemplazar parte del bagazo para la generación energética.
- **Residuos Forestales:** El mayor desafío para el aprovechamiento de los residuos forestales radica en la logística. Smurfit Westrock está por implementar una caldera de biomasa, lo cual podría limitar la disponibilidad para otros fines. Esto posiciona a esta biomasa en un rol complementario, el cual requerirá de una cadena de suministro y condiciones de negocio atractivas para su aprovechamiento.
- **Alcohol de primera generación:** Si bien su volumen total de producción no se podría destinar a una planta de SAF sin desatender el mercado de alcohol carburante, existe una capacidad instalada que hoy en día no se está aprovechando en su totalidad. Esto representan al menos 150 millones de litros anuales.
- **Otros Residuos Agrícolas:** Su mayor limitación es la dispersión y el menor volumen individual. Su potencial sería de fuente marginal o de nicho para complementar la biomasa requerida para una planta SAF de gran escala.

6.3. Identificación y Justificación de las Materias Primas Priorizadas para SAF en el Departamento del Valle del Cauca

Con base en la abundancia consolidada y la evaluación de la disponibilidad real, las materias primas que se perfilan como prioritarias para sustentar una planta de producción de SAF en el Valle del Cauca son:

1. Residuo Agrícola de Cosecha (RAC) de Caña de Azúcar:

Es la biomasa lignocelulósica de mayor disponibilidad neta de la región, incluso teniendo en consideración las necesidades de conservación del suelo. Su composición lo hace apto para rutas de conversión a SAF como la Gasificación-Fischer-Tropsch (G-FT) o la producción de Etanol Celulósico (2G) que sería el insumo para la producción de SAF (ATJ). La concentración de la agroindustria azucarera en el Valle podría facilitar la implementación de esquemas logísticos, aunque estos representen un desafío a superar.

2. Bioetanol de Primera Generación (1G) de Caña de Azúcar:

El Valle del Cauca ya posee una infraestructura y capacidad de producción de etanol 1G a gran escala. Esta corriente de producto es directamente compatible con la ruta Alcohol to Jet (ATJ) para producir SAF. La viabilidad de su uso para SAF dependerá de la capacidad de generar una producción adicional o de incentivos que hagan competitivo su desvío de su uso como carburante a SAF.

Materias Primas con Rol Secundario o Condicionado:

- **Bagazo de Caña de Azúcar:** Su priorización para SAF está fuertemente condicionada a la existencia de excedentes reales después de cubrir las necesidades de cogeneración de los ingenios o a una revalorización económica que justifique su desvío. De igual manera, podría haber excedentes en la medida que se sustituya su uso energético en las calderas de los ingenios con otras biomásas. Si estuviera disponible, sería un excelente insumo lignocelulósico.
- **Residuos Forestales:** Podrían ser una fuente complementaria de biomasa, especialmente si se desarrollan cadenas de suministro eficientes. Su volumen total disponible en el Valle es significativamente menor que el del RAC.

Las vinazas y otros residuos agroindustriales o agrícolas diversos, aunque importantes para la bioeconomía regional (ej. para biogás), no se consideran materias primas primarias directas para una planta de SAF de la escala probablemente contemplada, pero su valorización contribuye a la sostenibilidad general del sistema.

7. CONCLUSIONES SOBRE LA DISPONIBILIDAD DE MATERIAS PRIMAS (BIOMASA Y ETANOL) PARA UNA PLANTA SAF EN EL VALLE DEL CAUCA

El análisis de la disponibilidad de materias primas lignocelulósicas en el departamento del Valle del Cauca, basado principalmente en la revisión de los estudios “Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia”, “Cuantificación, caracterización y georreferenciación de la biomasa residual para aprovechamiento energético en el Valle Geográfico del Río Cauca” y “Estudio técnico integral para caracterizar las tecnologías de biocombustibles de segunda y tercera generación”, permite obtener conclusiones básicas para evaluar la factibilidad de implementar una planta de producción de Combustible Sostenible de Aviación (SAF) en la región, las cuales se presentan a continuación:

1. **Relevancia del cultivo de la caña de azúcar en la región:** Al ser el valle del río Cauca una región con agricultura especializada en caña de azúcar consecuentemente se presenta una alta generación de biomasa asociadas al cultivo. El RAC es la mayor fuente de biomasa lignocelulósica de la región, con un potencial de 1.5 millones de toneladas, ya habiendo descontado la biomasa que debe quedarse en el suelo para mantener los niveles de materia orgánica. Si bien aún la recolección y transporte representan un reto, ya hay experiencias en ese sentido que muestran alternativas viables. De otro lado, el bagazo de la caña se produce en más de 6,2 millones de toneladas al año, pero su disponibilidad es reducida en la medida que es utilizado para la generación de energía en las calderas de los ingenios y en la producción de papel. Una alternativa para su utilización en la producción de SAF es la sustitución de su uso energético mediante otra biomasa como el RAC u otra biomasa presente en la región. Como tercera biomasa está la vinaza, la cual tiene un alto potencial para la producción de biogás, que podría de manera indirecta aportar a la producción de SAF.
2. **Producción de alcohol de primera generación:** La región del valle del río Cauca es la principal productora de alcohol de primera generación del país. Actualmente el país cuenta con una capacidad instalada de 2'150.000 litros por día, de los cuales el 77% se encuentra en el valle del río Cauca. La producción anual de la industria colombiana es de 398 millones de litros anuales (promedio de los últimos 6 años) y tiene un potencial de 600 millones de litros anuales, por lo que sería factible producir al menos 150 millones de litros adicionales que sirvan de insumo a una planta de SAF con tecnología ATJ. Este flujo complementaría la producción de alcohol de segunda generación a partir de biomasa lignocelulósica y permitiría tener una mayor escala en la producción de SAF.

3. **Residuos forestales:** La actividad forestal comercial en la región es importante. La generación de biomasa se estima en 52 mil toneladas anuales. Las noticias recientes de la implementación de la caldera de biomasa de Smurfit Westrock reduce la disponibilidad para la producción de SAF. Se requiere estudiar con mayor profundidad esta disponibilidad para determinar los volúmenes efectivamente disponibles, sin embargo, todo apunta a que esta biomasa podría ser complementaria a las de caña de azúcar.
4. **Disponibilidad neta condicionada:** Los usos actuales de las biomásas lignocelulósicas presentes en la región están condicionadas bien sea por los usos actuales o por la logística de recolección. Esto implica la necesidad de establecer condiciones favorables que habiliten la recolección, mayor producción y/o desvío de usos actuales hacia la producción de SAF.
5. **Otras biomásas con aporte marginal:** Si bien en la región hay otros cultivos (plátano, banano, café) que tienen producción de biomásas lignocelulósicas residuales, la dispersión y el costo de la logística generan grandes limitaciones para su aprovechamiento. Es necesario profundizar el estudio de estas biomásas para su aprovechamiento como material complementario en la producción de SAF.
6. **Aspectos limitantes y habilitantes identificados:** Los principales aspectos limitantes identificados corresponden a los costos logísticos de la biomasa residual lignocelulósica, los costos de oportunidad debido a los usos actuales y la necesidad de inversión en tecnologías avanzadas para su aprovechamiento. Los principales aspectos habilitantes son la cercanía de la agroindustria de la caña, la experiencia e infraestructura de la producción de etanol y el potencial de integración de procesos para el aprovechamiento de sinergias y reducción de costos de logística.

Tabla 13: Resumen sobre la disponibilidad de biomasa en la región

Biomasa	Potencial (ton o l)	Aspectos habilitantes	Aspectos limitantes	Costo o costo de oportunidad	Disponibilidad neta (ton o l)
RAC	2,2 millones (sector) 1,6 millones (Valle)	<ul style="list-style-type: none"> - Alta disponibilidad - Fuente de lignocelulosa - Beneficio ambiental - Avance de la cosecha en verde - Interés en valorización 	<ul style="list-style-type: none"> - Logística de recolección y transporte - Necesidad de conservación del suelo - Alto contenido de humedad - Requerimiento de pretratamiento 	- Costo de densificación entre \$9 mil y \$22 mil por ton de RAC	<ul style="list-style-type: none"> - Al menos 1 millón de toneladas. - Es necesario profundizar, de acuerdo con la ubicación de la planta de SAF
Bagazo	6,2 millones de toneladas (sector) 4,7 millones de toneladas (Valle)	<ul style="list-style-type: none"> - Producción concentrada en los ingenios - Buen contenido energético y de lignocelulosa - Material homogéneo - Ideal para tecnologías avanzadas 	<ul style="list-style-type: none"> - Es el combustible de la cogeneración - Limitada disponibilidad - Costo de oportunidad - Contenido de humedad 	<ul style="list-style-type: none"> - Venta de energía eléctrica a la red - Venta para la producción de papel 	<ul style="list-style-type: none"> - La disponibilidad dependerá de la sustitución de combustible para la cogeneración. - El cierre de la planta de Carvajal de Yumbo libera al menos 200 mil toneladas.
Vinaza	900 millones de litros anuales de vinaza diluida	<ul style="list-style-type: none"> - Producción concentrada en las destilerías - Alto contenido de materia orgánica - Experiencias de biogás en Brasil - Digestato con contenido mineral 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto contenido de agua - Manejo de grandes volúmenes - Potencial corrosivo o inhibidor - Enfoque de tratamiento mas que de maximización energética - Manejo del digestato - Disponibilidad para SAF es indirecta 	Se requiere hacer una inversión importante para una planta de biogás/biometano	Dependerá de los proyectos de biogás que se implementen
Alcohol 1 G	600 millones de litros	<ul style="list-style-type: none"> - Industria consolidada - Materia prima disponible - Tecnología ATJ en avanzado estado de desarrollo - Sinergias con la agroindustria de la caña - Proximidad a puntos de consumo 	<ul style="list-style-type: none"> - Alcohol comprometido para mercado de alcohol carburante - Costo de oportunidad - Necesidad de políticas de apoyo para SAF - Disponibilidad de hidrógeno escasa - Inversiones en logística y almacenamiento de SAF 	<ul style="list-style-type: none"> - Precio regulado de alcohol carburante - Costo de oportunidad de exportación de azúcar 	Al menos 150 millones de litros de producción adicional al promedio de los últimos 6 años.
Biomasa forestal	52 mil toneladas	<ul style="list-style-type: none"> - Fuente de lignocelulosa - Producción en la región - No compite con alimentos 	<ul style="list-style-type: none"> - Dispersión y logística - Volumen no es suficiente para una planta de SAF - Pretratamiento - Uso en caldera de biomasa - Disponibilidad de información escasa 	- Costo de oportunidad de la generación de energía en la caldera de biomasa de Smurfit Westrock a partir de 2025	Dependerá de los costos de logística y del volumen usado como energético
Biomasa otros cultivos	3,2 millones de toneladas	<ul style="list-style-type: none"> - Diversificación - Composición lignocelulósica 	<ul style="list-style-type: none"> - Dispersión - Volumen comparativamente menor (individualmente) - Posibles usos actuales - Costos logísticos 	<ul style="list-style-type: none"> - Costos logísticos - Algunos usos en alimentación animal y compostaje 	Es necesario profundizar en investigaciones sobre recolección y transporte que lo habiliten.

8. RECOMENDACIONES

A partir del análisis de la disponibilidad de materias primas (biomasa residual lignocelulósica y bioetanol de primera generación) en el departamento del Valle del Cauca y su potencial para la producción de Combustible Sostenible de Aviación (SAF), se desprenden las siguientes recomendaciones. Estas buscan orientar los siguientes pasos para la región y proporcionar insumos para la toma de decisiones por parte de Invest Pacific y otros actores relevantes:

8.1. Futuros estudios

- **Cadena de suministro y logística de RAC:** El RAC es la biomasa lignocelulósica más abundante. Es necesario poder masificar el uso del RAC para fines energéticos y su movilización eficiente es crítica. Por esta razón, se requiere un estudio actualizado con los más recientes casos de éxito nacionales e internacionales que permita poner en conocimiento de los empresarios esta alternativa. Esto se debe complementar con un programa de transferencia de tecnología, de forma que se pueda avanzar rápido en su implementación.
- **Evaluación de la viabilidad de producción de alcohol de 2G en el Valle del Cauca:** Dados los requerimientos de sostenibilidad establecidos en el estándar de CORSIA, es altamente recomendable realizar la producción de SAF a partir de residuos de biomasa. De otro lado, es una manera de incrementar la oferta de alcohol de la región, lo cual viabilizaría la ampliación de la producción de SAF.
- **Análisis detallado de excedentes de bagazo:** El bagazo es una biomasa de condiciones ideales tanto por su composición como por su homogeneidad. Se hace necesario entonces contar con información mucho más detallada sobre su producción y usos actuales para determinar los volúmenes que puedan ser excedentarios para otros usos energéticos como el SAF. De la misma manera, entender los costos de oportunidad actuales es fundamental para encontrar alternativas a sus usos actuales y que se aumente la disponibilidad para usos de mayor valor agregado, como el SAF.
- **Disponibilidad y logística de residuos forestales en el Valle:** La biomasa forestal tiene un menor volumen al de los residuos de caña de azúcar, sin embargo, es una alternativa para la diversificación de materias primas. Se requiere tener más información sobre su localización (tanto en campo, como su uso en papeleras y aserraderos) y cuantificación, estimar los costos de recolección y transporte para ser considerados una fuente complementaria de

biomasa para una planta de producción de SAF que utilice alcohol de segunda generación como insumo.

8.2. Desarrollo de políticas y toma de decisiones

- **Articulación Público – Privada – Academia:** El desarrollo de esta nueva industria requiere de un esfuerzo coordinado. Si bien se cuenta con todos los elementos para comenzar, aún faltan aspectos por trabajar. Es necesario entonces promover la realización de mesas de trabajo entre los generadores de la biomasa, entidades gubernamentales de orden municipal y regional, academia, centros de investigación y desarrollo, inversionistas y demás interesados, para desarrollar una hoja de ruta que culmine con un plan de trabajo para establecer una planta de SAF en la región. Es necesario que esto esté en armonía con la Hoja de Ruta del SAF que se publicó en 2025 por parte de la Aerocivil.
- **Diseño de incentivos para movilización de biomasa residual:** Actualmente se está comenzando con la implementación de esta práctica. Es necesario generar incentivos (fiscales, financieros y/o técnicos) que aceleren el proceso de desarrollo e implementación en la región, dado que una de las principales barreras es el alto costo de esta operación.
- **Marco regulatorio para SAF:** Las inversiones requieren reducir los grados de incertidumbre, por lo que se necesitan reglas claras para la operación del mercado, la aplicación de beneficios tributarios, así como claridad en torno a la calidad y sostenibilidad del producto. De acuerdo con esto, es necesario tomar como base la Hoja de Ruta del SAF y ajustar la agenda regional y participar de las discusiones nacionales.
- **Investigación, desarrollo e innovación (I+D+i):** El fortalecimiento de las capacidades locales es importante para encontrar soluciones que se adapten a la realidad y condiciones de la región. En el Valle del Cauca existen centros de investigación públicos, privados y universidades que podrían crear soluciones para la recolección y pretratamiento de la biomasa. Una alternativa es evaluar un esquema de innovación abierta donde puedan participar los centros interesados que estén o no en la región.
- **Desarrollo de un micro clúster alrededor del SAF:** Para lograr que la producción de SAF en la región sea una realidad se deben coordinar múltiples esfuerzos. Esto nos lleva a que la interrelación de diferentes eslabones de la cadena pueda conformarse como un micro clúster al rededor del SAF. DE esta manera, se pueden dividir las inversiones a lo largo de la cadena, logras especializaciones en cada uno de los procesos y alcanzar una mayor eficiencia. Desde la recolección y pretratamiento de la materia prima, siguiendo por la

producción de insumos críticos como el hidrógeno, la energía eléctrica, el alcohol 1G, un productor de alcohol de 2G y el productor de SAF.

- **Certificaciones de sostenibilidad:** Para que el SAF cumpla con el estándar de CORSIA es necesario la certificación de los eslabones de la cadena correspondientes. Es de gran importancia que se pueda contar con el apoyo tanto técnico como económico para lograr las certificaciones, especialmente en los productores de menor tamaño. Esto representa una oportunidad para establecer un programa que beneficie a la cadena entera.

9. BIBLIOGRAFÍA

1. **Consorcio Biocombustibles de Colombia (USAENE & TECSOL). (2023, diciembre).** *Estudio técnico integral para caracterizar las tecnologías de biocombustibles de segunda y tercera generación con análisis B/C y los requerimientos técnico-económicos para la instalación de una biorrefinería. Producto 2: Caracterización de tecnologías y análisis de BC2G&3G.* Presentado a la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). Bogotá D.C.
2. **Consorcio Biocombustibles de Colombia (USAENE & TECSOL). (2023, diciembre).** *Estudio técnico integral para caracterizar las tecnologías de biocombustibles de segunda y tercera generación con análisis B/C y los requerimientos técnico-económicos para la instalación de una biorrefinería. Producto 3: Informe prospectivo sobre el potencial en biocombustibles de segunda y tercera generación en Colombia.* Presentado a la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). Bogotá D.C.
3. **Consorcio Biocombustibles de Colombia (USAENE & TECSOL). (2023, diciembre).** *Estudio técnico integral para caracterizar las tecnologías de biocombustibles de segunda y tercera generación con análisis B/C y los requerimientos técnico-económicos para la instalación de una biorrefinería. Producto 4: Resumen para tomadores de decisiones.* Presentado a la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). Bogotá D.C.
4. **Grupo de Investigación en Eficiencia Energética y Energías Alternativas (GEAL). (2016, junio).** *Cuantificación, caracterización y georreferenciación de la biomasa residual para aprovechamiento energético en el Valle Geográfico del Río Cauca.* Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Facultad de Ingeniería y Administración. Palmira, Colombia.
5. **Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias), y Universidad Industrial de Santander (UIS). (c. 2010).** *Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia.* Bogotá D.C.: UPME.
6. **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.
7. **Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.** Boletín Estadístico Forestal, Ediciones 1, 3, 5, 7 y 9.