



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ESTUDIO DE DISPONIBILIDAD DE MATERIA PRIMA Y FACTIBILIDAD
TÉCNICA PARA LA PRODUCCIÓN DE SAF EN CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

FABIÁN DAVID OLAVE PÉREZ

PROFESOR GUÍA:
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ROMINA ALTAMIRANO ALTAMIRANO
BARBARA SILVA SILVA

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por:
Agencia de Sostenibilidad Energética

SANTIAGO DE CHILE

2023

ESTUDIO DE DISPONIBILIDAD DE MATERIA PRIMA Y FACTIBILIDAD TÉCNICA PARA LA PRODUCCIÓN DE SAF EN CHILE

La industria de la aviación es responsable de aproximadamente un 2 % de las emisiones globales de CO_2 , es por esto que desde hace algunos años la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) se ha fijado una serie de metas enfocadas en la descarbonización de la aviación civil, las cuales van desde generar una mejora energética en un 2 % anual hacia el año 2050, hasta estabilizar las emisiones netas de CO_2 de la aviación mediante un crecimiento carbono neutral a partir del año 2020. Pero la meta más ambiciosa de la Asamblea General de la OACI corresponde a la meta a largo plazo de tener cero emisiones netas en la aviación internacional para el año 2050.

Para lograr estas metas, la OACI ha planteado una serie de medidas que aportan a la reducción de gases de efecto invernadero, dentro de las cuales se encuentra la masificación del uso de combustibles sostenibles de aviación (SAF, por sus siglas en inglés), llegando a contribuir hasta un 53 % en alcanzar la carbono neutralidad al año 2050. Los SAF corresponden a un tipo de combustible sintético, generado a partir de diversas materias primas como lo pueden ser el material lignocelulósico, diversos cultivos y sus desechos, residuos sólidos municipales, entre otros, estas materias primas son procesadas mediante el uso de tecnologías basadas en procesos como Fischer-Tropsch, hidroprocesamiento de ésteres y ácidos grasos, alcohol-to-jet, power-to-liquid, entre otros, según el tipo de materia prima disponible.

El objetivo general del trabajo corresponde a establecer la disponibilidad de materias primas disponibles en Chile, y proponer las tecnologías que mejor se adapten a estas materias primas con el fin de producir SAF. Mientras que los objetivos específicos para lograr esto corresponden a la identificación de las materias primas disponibles en Chile, cuantificar la disponibilidad de estas materias primas en sus respectivas regiones y finalmente identificar las tecnologías que mejor permitan sintetizar SAF a partir de estas materias primas.

La metodología a seguir consta de una serie de procesos de investigación bibliográfica, acompañados de entrevistas y reuniones con actores relevantes dentro de la academia y el mundo privado, esto con el fin de establecer las distintas materias primas con potencial de ser usadas para la producción de SAF, y las tecnologías que pueden hacer uso de estas.

Se logra el objetivo general del trabajo, proponiendo las materias primas y tecnologías que mejor se pueden adaptar a una eventual producción de SAF en Chile, permitiendo identificar que las tecnologías *PtL* y *FT* presentan el mayor potencial de cubrir la demanda de SAF en Chile.

A mi madre, familia y amigos.

Tabla de Contenido

| | |
|---|-----------|
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Objetivos | 2 |
| 1.1.1. Objetivo general | 2 |
| 1.1.2. Objetivos específicos | 2 |
| 2. Antecedentes | 3 |
| 2.1. Tipos de combustibles de aviación | 3 |
| 2.1.1. Combustibles tradicionales | 3 |
| 2.1.2. Combustibles alternativos | 4 |
| 2.1.2.1. Combustible de sustitución directa | 4 |
| 2.1.2.2. Combustibles de sustitución no directa | 5 |
| 2.2. Combustibles de Aviación Sostenibles (<i>SAF</i>) | 5 |
| 2.3. Criterios de sostenibilidad | 6 |
| 2.4. Metodos de Conversión | 8 |
| 2.4.1. Fischer-Tropsch | 8 |
| 2.4.1.1. Fischer-Tropsch más aromáticos | 8 |
| 2.4.1.2. Co-Hidroprocesamiento de Hidrocarburos Fischer-Tropsch | 8 |
| 2.4.2. Ésteres y Ácidos Grasos Hidro-procesados | 9 |
| 2.4.2.1. Co-Hidroprocesamiento de Ésteres y Ácidos Grasos | 9 |
| 2.4.2.2. Hidrocarburos-Ésteres y Ácidos Grasos Hidro-procesados | 10 |
| 2.4.3. Iso-Parafinas Sintéticas | 10 |
| 2.4.4. Derivados del Alcohol | 11 |
| 2.4.5. Hidrotermólisis Catalítica | 11 |
| 2.4.6. Derivados del Hidrógeno | 12 |
| 2.5. Materias primas | 12 |
| 2.6. Limitación en el uso de nuevos energéticos en la aviación | 14 |
| 2.7. Efectos del uso de SAF en motores | 15 |
| 3. Metodología | 17 |
| 3.1. Investigación de Materias Primas en Chile | 17 |
| 3.1.1. Investigación de Estándares de Sustentabilidad | 17 |
| 3.1.2. Identificación de Materias Primas | 17 |
| 3.1.3. Investigación Centrada en Chile | 18 |
| 3.2. Investigación de Tecnologías | 18 |
| 3.2.1. Identificación de Tecnologías | 18 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.2.2. | Selección de Tecnologías | 18 |
| 3.2.3. | Establecer Matrices de Decisión | 18 |
| 4. | Resultados | 20 |
| 4.1. | Mesa SAF | 20 |
| 4.1.1. | Segunda sesión Mesa SAF | 20 |
| 4.1.2. | Tercera sesión Mesa SAF | 21 |
| 4.1.3. | Cuarta sesión Mesa SAF | 22 |
| 4.2. | Materias primas | 23 |
| 4.2.1. | Aceites de cocina usados | 24 |
| 4.2.2. | Neumáticos fuera de uso | 25 |
| 4.2.3. | Desechos sólidos municipales | 25 |
| 4.2.4. | Cultivos altos en aceites | 27 |
| 4.2.5. | Biomasa forestal | 27 |
| 4.2.6. | Hidrógeno verde | 28 |
| 4.3. | Tecnologías de conversión | 30 |
| 4.4. | Propuesta enfocada en Chile | 33 |
| 5. | Conclusiones y discusión | 36 |
| | Bibliografía | 38 |
| | Anexos | 43 |
| A. | Resultados | 43 |
| A.1. | Residuos sólidos municipales | 43 |
| A.2. | Biomasa Forestal | 46 |
| B. | Entrevista | 47 |
| B.1. | Transcripción entrevista Dra. Cristina Segura, UdeC. | 47 |

Índice de Tablas

| | | |
|-------|---|----|
| 2.1. | Materias primas usadas y límites de mezcla para los seis procesos principales de producción de <i>SAF</i> [11]. | 14 |
| 2.2. | Potencial uso de nuevos energéticos para para distintos tipos de aeronaves y la participación de pasajeros en Chile [23]. | 15 |
| 4.1. | Datos presentados por <i>CORMA</i> durante la tercera sesión de la Mesa SAF [30]. | 22 |
| 4.2. | Datos presentados por <i>UdeC</i> durante la cuarta sesión de la Mesa SAF [32]. | 23 |
| 4.3. | Biomasa disponible estimada en la zona centro-sur, 2015 [45]. | 28 |
| 4.4. | Origen de los residuos forestales disponibles para la producción de <i>SAF</i> [44]. | 28 |
| 4.5. | Rendimiento promedio para los procesos de conversión estudiados, a partir de la información obtenida en [16, 49–52]. | 30 |
| 4.6. | Tabla comparativa de las diversas tecnologías consideradas en este estudio, basada en Okolie et al. (2023) [53]. | 31 |
| 4.7. | Matriz de decisión resultante para los distintos procesos estudiados. | 33 |
| 4.8. | Matriz de decisión resultante para las materias primas identificadas. | 33 |
| 4.9. | Estimación de emisiones y consumo de combustible para Chile [55]. | 34 |
| 4.10. | Consumo estimado de combustible para el mercado doméstico e internacional en Chile, 2025-2040. | 35 |
| 4.11. | Producción de <i>SAF</i> estimada para las distintas materias primas. | 35 |

Índice de Ilustraciones

| | | |
|------|---|----|
| 2.1. | Descripción del ciclo de vida de las emisiones de CO_2 para combustibles fósiles [4]. . . . | 4 |
| 2.2. | Descripción genérica de un proceso de conversión de <i>SAF</i> [13]. | 6 |
| 2.3. | Descripción del ciclo de vida de las emisiones de CO_2 para la producción de <i>SAF</i> [4]. . . | 6 |
| 2.4. | Descripción del proceso de conversión de materias primas a <i>SAF</i> mediante Fischer-Tropsch, elaboración propia. | 8 |
| 2.5. | Descripción del proceso de conversión de materias primas a <i>SAF</i> mediante el uso de HEFA, elaboración propia. | 9 |
| 2.6. | Descripción del proceso de conversión de materias primas a <i>SAF</i> mediante Iso-Parafinas Sintéticas, elaboración propia. | 10 |
| 2.7. | Descripción del proceso de conversión de materias primas a <i>SAF</i> mediante Alcohol-to-Jet, elaboración propia. | 11 |
| 2.8. | Descripción del proceso de conversión de materias primas a <i>SAF</i> mediante Hidrotermólisis Catalítica, elaboración propia. | 11 |
| 2.9. | Descripción del proceso de conversión de materias primas a <i>SAF</i> mediante Power-to-Liquid [16]. | 12 |
| 4.1. | Mapa resumen mostrando la distribución aproximada de materias primas en Chile, elaboración propia. | 24 |
| 4.2. | Distribución estimada de las toneladas de desechos sólidos producidos en Chile, elaboración propia basados en datos del MMA[39]. | 26 |
| 4.3. | Disponibilidad energética potencial de recursos renovables estimada para la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, 2020. | 29 |
| 4.4. | Costo nivelado de electricidad renovable estimado en la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, 2020. | 29 |
| A.1. | Generación de Residuos Municipales a Nivel Regional estimado en base a lo reportado en SINADER, 2018. | 43 |
| A.2. | Comunas con la mayor generación de Residuos Municipales, 2018. | 44 |
| A.3. | Comunas con la mayor tasa Per Cápita de Residuos Municipales, 2018. | 45 |
| A.4. | Biomasa total y potencial disponible en función de proporción de extracción, aprovechamiento y restricciones ambientales y legales por provincia, tipo y subtipo forestal (Altamirano et al, 2015). | 46 |

1. Introducción

Actualmente la industria aeronáutica, mediante la Organización de Aviación Civil Internacional (*OACI*) perteneciente a la *ONU*, se plantea la meta de reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero, y en particular su huella de CO_2 , apuntando a ser una industria carbono neutral para el año 2050 [1]. Si bien el desarrollo de nuevas tecnologías como aviones eléctricos o el desarrollo de motores que puedan aprovechar combustibles altamente eficientes, como lo es el hidrógeno, presentan un gran potencial, es la poca madurez de estas tecnologías las que limitan su uso. Debido a lo anterior, la *OACI* ha presentado una serie de iniciativas para reducir la huella de carbono presente en la industria de la aviación mediante el uso de tecnologías disponibles en la actualidad, jugando un rol clave iniciativas como el Sistema de Compensación y Reducción de Emisiones de Carbono para la Aviación Internacional (*CORSIA*) y Combustibles de Aviación Sustentables (*SAF*), donde es esta última iniciativa la que muestra el mayor potencial para la reducción de emisiones de CO_2 a largo plazo.

La iniciativa enfocada en *SAF* se centra, como su nombre lo indica, en producir combustibles de aviación que sean caracterizados como sostenibles y que puedan ser mezclados de manera directa con combustibles fósiles tradicionales, o directamente reemplazar su uso al largo plazo, estos combustibles son generados a partir de diversas materias primas, como lo pueden ser el material lignocelulósico, diversos cultivos y sus respectivos desechos, desechos sólidos municipales, entre muchas otras.

El presente trabajo tiene como objetivo identificar diversas materias disponibles dentro del territorio nacional, y proponer las tecnologías mejor adaptadas para la producción de *SAF* en Chile. Esto mediante un proceso de investigación bibliográfica el cual permita identificar las diversas materias primas y las diversas tecnologías que pueden ser usadas para la producción de *SAF*.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Proponer las materias primas y tecnologías mejor adaptadas para la producción de *SAF* en Chile.

1.1.2. Objetivos específicos

- Identificar las materias primas disponibles en Chile que pudieran ser usadas para la producción de *SAF*.
- Cuantificar la disponibilidad de estas materias primas en sus respectivas regiones.
- Identificar las tecnologías que mejor permitan sintetizar *SAF* a partir de estas materias primas.

2. Antecedentes

2.1. Tipos de combustibles de aviación

2.1.1. Combustibles tradicionales

Los principales combustibles usados, en la industria de la aviación civil, corresponden al combustible *Jet Fuel A*, junto a su variante *Jet Fuel A-1*, y en menor medida a la gasolina de aviación.

Estos combustibles son usados en turbinas cuyos reactores son de tipo queroseno, por lo que tanto el combustible *Jet Fuel A*, *A-1* y gasolina de aviación son producidos según especificaciones entregadas en la norma *ASTM D1655* [2], de manera que sea posible cargar combustible en cualquier aeropuerto sin alterar el proceso de combustión de la turbina.

Una de las principales características que comparten todos los combustibles fósiles tradicionales corresponde a como se puede describir el ciclo de vida de las emisiones de gases de efecto invernadero (*GEI*) producidos por estos combustibles, durante toda la cadena de suministro de estos combustibles existe una constante emisión de *GEI* los cuales son asociados a procesos que resultan prácticamente imposibles de eliminar, como lo son los procesos de extracción de la materia prima, los procesos de refinamiento y el mismo transporte del combustible, sin contar con la quema del mismo y sus respectivas emisiones. Para los combustibles tradicionales de aviación la *OACI* propone un valor de emisiones durante el ciclo de vida de $89 \frac{gCO_2}{MJ}$ [3].

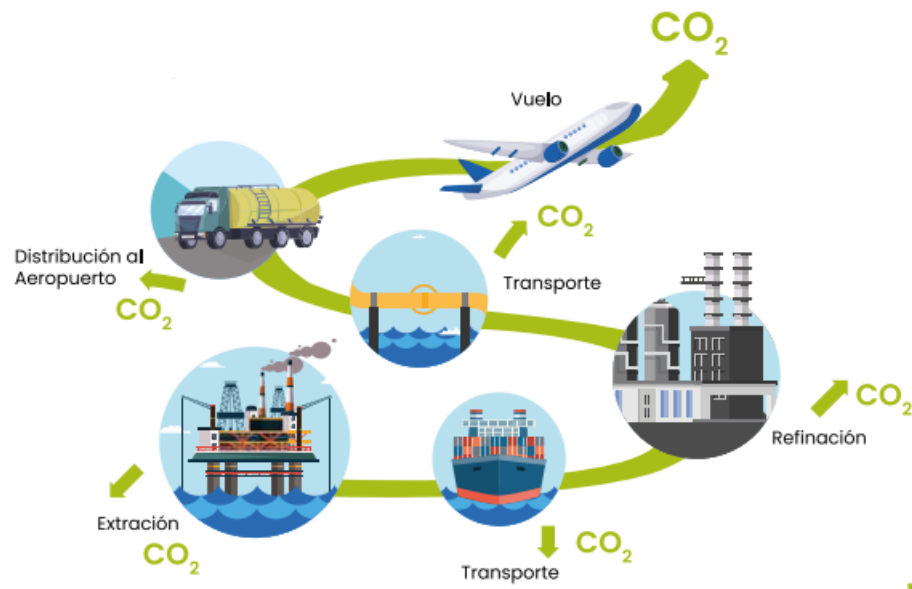


Figura 2.1: Descripción del ciclo de vida de las emisiones de CO_2 para combustibles fósiles [4].

2.1.2. Combustibles alternativos

2.1.2.1. Combustible de sustitución directa

Los combustibles de sustitución directa, o *Drop-in*, corresponden a combustibles alternativos de aviación que presentan las mismas características que su equivalente tradicional, debido a que resulta químicamente indistinguible uno del otro. En el caso de los combustibles de aviación sostenibles, se consideran como reemplazo para los combustibles *Jet Fuel A* y *A-1*. Por lo anterior, el uso de estos combustibles alternativos logra sustituir directamente a sus contra partes tradicionales sin necesidad de modificar, o actualizar, las tecnologías presentes en las aeronaves actuales [5].

Dentro de este tipo de combustibles se encuentran los Combustibles de Aviación más Bajos en Carbono, denominados *LCAF* por sus siglas en inglés, este tipo de combustibles fósiles son producidos a partir de procesos que resultan en una menor huella de carbono, cuya intensidad de carbono es menor a $80,1 \frac{gCO_2}{MJ}$ [6].

Adicionalmente se tiene dentro de esta categoría a los Combustibles de Aviación Sostenible, o *SAF* por sus siglas en inglés, los cuales corresponden a combustibles producidos a partir de materias primas de carácter renovable o correspondiente a residuos. Estos combustibles deben cumplir con los criterios de sostenibilidad acordados en la Convención de Chicago, y expuestos en el anexo 16, volumen IV [3].

Estos tipos de combustibles pueden ser categorizados según la tecnología seleccionada para su producción:

- Fischer-Tropsch.
- Esteres y ácidos grasos hidro-procesados.

- Iso-parafinas sintéticas.
- Alcohol-to-Jet.
- Hidrotermólisis catalítica.
- Power-to-Liquid.

2.1.2.2. Combustibles de sustitución no directa

Los combustibles de sustitución no directa, o *Non-drop in*, corresponden a combustibles que no pueden ser usados para las turbinas y tecnologías compatibles con los combustibles convencionales, usadas en las aeronaves actuales. Por lo que se requiere un cambio significativo en cuanto a la estructura, tecnologías y/o método de suministro usado en la actualidad [7].

Posibles combustibles *Non-drop in* corresponden a[5]:

- Electricidad.
- Gas licuado de aviación.
- Hidrógeno.

2.2. Combustibles de Aviación Sostenibles (*SAF*)

Un combustible se considera sostenible, si cumple los distintos criterios de sostenibilidad establecidos por organizaciones internacionales como la *OACI*, los cuales limitan el efecto nocivo que los procesos de producción de estos combustibles pudieran tener con el medio ambiente, de no cumplirse estos criterios el combustible solo puede ser reconocido como un combustible *LCAF* [6].

Para que cualquier combustible sea considerado apto para su uso en la aviación a nivel global, se deben cumplir con las especificaciones dictadas por al menos uno de los siguientes estándares *DEF STAN 91-91* [8], *ASTM D1655* o *MIL-DTL-83133/5624* [2, 9]. En el caso de Chile el uso de combustibles de aviación viene normado por el Decreto 160 del Ministerio de Economía [10], y debe cumplir con el estándar *ASTM D4045*, donde se regula el contenido de azufre de los combustibles.

Hasta la fecha existen 9 procesos de conversión usados para la producción de *SAF* que cuentan con la aprobación de normas internacionales tales como las normas *ASTM D7566* y *ASTM D1655* [11, 12], siendo estos estándares los cuales regulan las especificaciones técnicas para los *SAF*. Estas especificaciones abarcan desde el proceso de producción de *SAF* hasta los porcentajes de mezcla entre combustibles fósiles tradicionales y sus equivalentes alternativos.

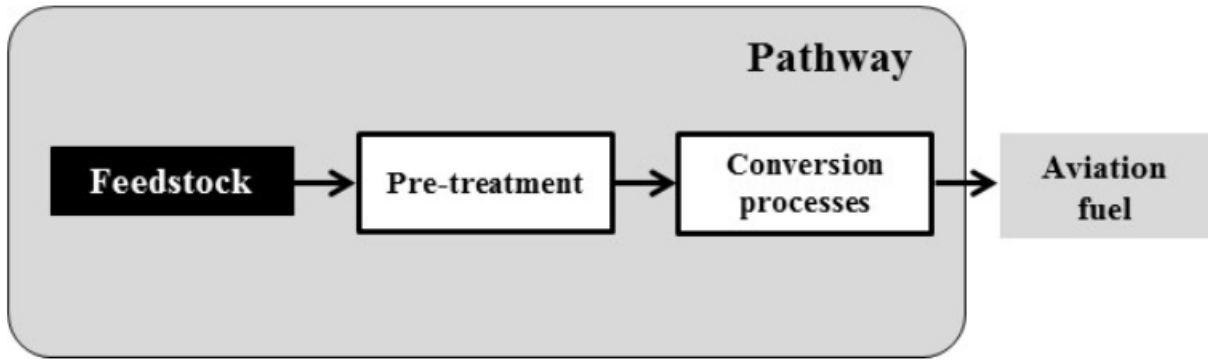


Figura 2.2: Descripción genérica de un proceso de conversión de *SAF* [13].

En la producción de *SAF* existe una gran variedad de materias primas disponibles actualmente que cuentan con la aprobación necesaria, y resultan energicamente viables para la producción de estos combustibles. Una de las características más importantes de estas materias primas se centra en que, al considerar las emisiones durante todo el ciclo de vida del combustible, se tiene una reducción notable en las emisiones de *GEI* [14], debido a que estas materias primas mitigan de una u otra forma las emisiones de *GEI* durante su proceso de obtención, llegando a reducir estas emisiones entre un 50 % y un 80 % [IATA].



Figura 2.3: Descripción del ciclo de vida de las emisiones de CO_2 para la producción de *SAF* [4].

2.3. Criterios de sostenibilidad

Se entiende por criterios de sostenibilidad las diversas consideraciones que se deben tener en cuenta a la hora de evaluar el impacto social, ambiental y económico de los diversos combustibles y procesos de producción que podrían resultar en una reducción de emisiones de *GEI*, resultando así en un combustible que pudiera ser considerado sostenible. Para que un combustible de aviación alternativo sea considerado como un *SAF*, este debe cumplir con los criterios de sostenibilidad definidos por la *OACI* según lo establecido en el acuerdo *CORSIA* [15].

Los criterios básicos a cumplir corresponden a los siguientes:

- El combustible escogido debe generar, al menos, un 10% menos de emisiones de CO_2 durante su ciclo de vida completo, al ser comparado con las emisiones generadas por un combustibles de aviación tradicional.
- El combustible escogido no debe ser producido a partir de biomasa proveniente de tierras con una alta reserva de carbono.
- La producción del combustible escogido debe mantener, o incluso mejorar, la calidad y disponibilidad de agua y la calidad del suelo.
- La producción del combustible escogido debe minimizar los efectos negativos en la calidad del aire.
- La producción del combustible escogido debe mantener, o minimizar, el impacto a la biodiversidad.
- La producción del combustibles escogido debe promover el manejo responsable de desechos químicos.
- La producción del combustible escogido debe tener en consideración el respeto de los derechos humanos y laborales.
- La producción del combustible escogido debe respetar los derechos de suelo y usos de estos, incluyendo derechos reservados para pueblos indígenas.
- La producción del combustible escogido debe contribuir al desarrollo social y económico de regiones en situación de pobreza.
- La producción del combustible escogido debe promover la seguridad alimenticia en regiones con escasez de alimentos.

Donde el cálculo de la reducción de emisiones del combustible es calculado según la siguiente fórmula [3]:

$$ER_y = FCF * \left(\sum_f MS_{f,y} * \left(1 - \frac{LS_f}{LC} \right) \right) \quad (2.1)$$

donde:

- ER_y : Reducción de emisiones por el uso de combustibles admisibles en el año y (en toneladas).
- FCF : Factor de conversión de combustible, equivalente a $3,16 \frac{kgCO_2}{kgdecombustible}$, en el caso de *Jet A* y *Jet A-1*.
- $MS_{f,y}$: Masa total de combustible admisible en el marco *CORSIA* en el año dado y (en toneladas).
- LS_f : Valor de las emisiones durante el ciclo de vida de un combustible admisible (en $\frac{gCO_2e}{MJ}$).
- LC : Valor de referencia de las emisiones durante el ciclo de vida del combustible de aviación convencional, equivalente a $89 \frac{gCO_2e}{MJ}$.

2.4. Metodos de Conversión

2.4.1. Fischer-Tropsch

El proceso de Fischer-Tropsch (*FT*) corresponde a un proceso de conversión, el cual se basa en la gasificación de biomasa con el fin de obtener gas de síntesis, o *syngas*, donde el *syngas* producido es posteriormente depurado y acondicionado a altas temperaturas, con el fin de optimizar su calidad, para luego ser sometido a un proceso de conversión catalítica, donde se forman hidrocarburos líquidos. En el caso de usar *FT* para la producción de combustibles de aviación un proceso de mejora, posterior a la obtención de hidrocarburos líquidos, puede ser necesario.

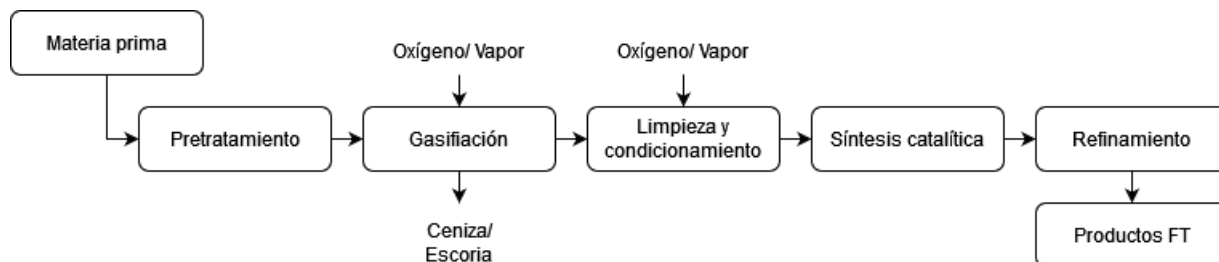


Figura 2.4: Descripción del proceso de conversión de materias primas a *SAF* mediante Fischer-Tropsch, elaboración propia.

La producción de *SAF* mediante el uso de *FT* se encuentra regulada según la norma *ASTM D7566*, anexo 1, en la cual se limita el porcentaje de mezcla entre el *SAF* resultante del proceso y combustibles fósiles tradicionales en un máximo del 50% [11].

2.4.1.1. Fischer-Tropsch más aromáticos

Este proceso de conversión, basado en el proceso original de *FT*, cuenta con la característica adicional de hacer uso de un proceso de alcalinización para disminuir la cantidad de ácidos presentes en moléculas aromáticas ligeras no derivadas del petróleo, principalmente benceno, esto con el fin de obtener moléculas aromáticas de mejor calidad, lo cual permitiría una mejor mezcla con combustibles fósiles tradicionales, aumentando así el porcentaje máximo de mezcla para materias primas poco eficientes.

La producción de *SAF* mediante el uso de *FT* se encuentra regulada según la norma *ASTM D7566*, anexo 4, en la cual se limita el porcentaje de mezcla entre el *SAF* resultante del proceso y combustibles fósiles tradicionales en un máximo del 50% [11].

2.4.1.2. Co-Hidroprocesamiento de Hidrocarburos Fischer-Tropsch

A diferencia que el proceso *FT* tradicional, este proceso es realizado a partir de materia prima presente en una refinería tradicional de petróleo, por lo que es necesario adicionar una etapa de hidroprocesamiento para asegurar que la cantidad de azufre presente en el producto final, medido en PPM, se encuentre dentro de las normas establecidas.

Este proceso se encuentra regulado por la norma *ASTM D1655*, anexo A1, en la cual se limita el

porcentaje de mezcla entre los combustibles fósiles tradicionales y el *SAF* producido por este proceso en un máximo del 5% [11].

2.4.2. Ésteres y Ácidos Grasos Hidro-procesados

El uso de tecnologías basadas en ésteres y ácidos grasos hidro-procesados, o *HEFA* por sus siglas en inglés, consisten en el hidro-procesamiento de materias primas lipídicas, mediante el aprovechamiento de varios mecanismos de reacciones catalíticas en presencia de hidrógeno.

El primer paso de este proceso consiste en la saturación de los enlaces dobles de la cadena lipídica mediante la adición catalítica de hidrógeno, normalmente conocida como hidrogenación. Posterior al proceso de hidrogenación se vuelve a adicionar hidrógeno en reactor catalítico, lo cual sirve para remover el grupo carbonilo, y de manera simultánea se rompen los compuestos de glicerol, formando propano y cadena de ácidos grasos libres. Las cadenas de ácidos resultantes se encuentran unidas a ácidos carboxílicos, los cuales necesitan ser removidos para poder formar cadenas de parafina rectas, donde principalmente se usan los siguiente métodos:

- Hidrodesoxigenación
- Descarboxilación
- Descarbonilación

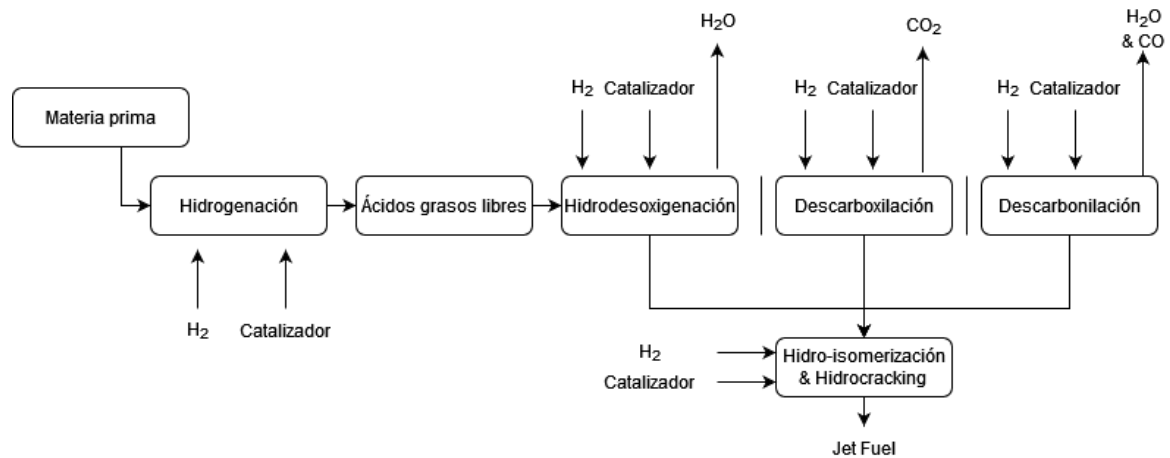


Figura 2.5: Descripción del proceso de conversión de materias primas a *SAF* mediante el uso de *HEFA*, elaboración propia.

El *SAF* resultante de estos procesos se encuentra regulado por la norma *ASTM D7566*, anexo 2, en la cual se limita el porcentaje de mezcla entre los combustibles fósiles tradicionales y el *SAF* resultante en un máximo del 50% [11].

2.4.2.1. Co-Hidroprocesamiento de Ésteres y Ácidos Grasos

Este método alternativo para la obtención de *SAF*, basado en el proceso tradicional de *HEFA*, se caracteriza por ser llevado a cabo en una refinería convencional de petróleo, este proceso hace uso de

las materias residuales del proceso de refinería, para luego ser usadas como materias primas en un proceso tradicional de *HEFA*.

Este proceso se encuentra regulado por la norma *ASTM D1655*, anexo A1, en la cual se limita el porcentaje de mezcla entre los combustibles fósiles tradicionales y el *SAF* producido por este proceso en un máximo del 5 % [11].

2.4.2.2. Hidrocarburos-Ésteres y Ácidos Grasos Hidro-procesados

Este proceso alternativo deriva del mismo mecanismo usado tradicionalmente en *HEFA*, con la diferencia que su materia prima no corresponde únicamente a ácidos grasos y ésteres, si no que se considera el uso de hidrocarburos de manera adicional.

Los *SAF* producidos por este método de conversión se encuentran regulados por la norma *ASTM D7566*, anexo 7, la cual limita el porcentaje de mezcla entre combustibles fósiles tradicionales y el *SAF* resultante en un máximo del 10 % [11].

2.4.3. Iso-Parafinas Sintéticas

Las iso-parafinas sintéticas, o *SIP* por sus siglas en inglés, son obtenidas a partir de tecnologías basadas en la conversión bioquímica donde el *SAF* es producido de manera biológica, mediante la fermentación de azúcar. En este proceso se hace uso de microorganismos que sintetizan una molécula de hidrocarburo llamada farneseno, la cual puede ser convertida a su vez en bio combustible llamado *Farnesane*, el cual puede ser mezclado con combustibles fósiles tradicionales.

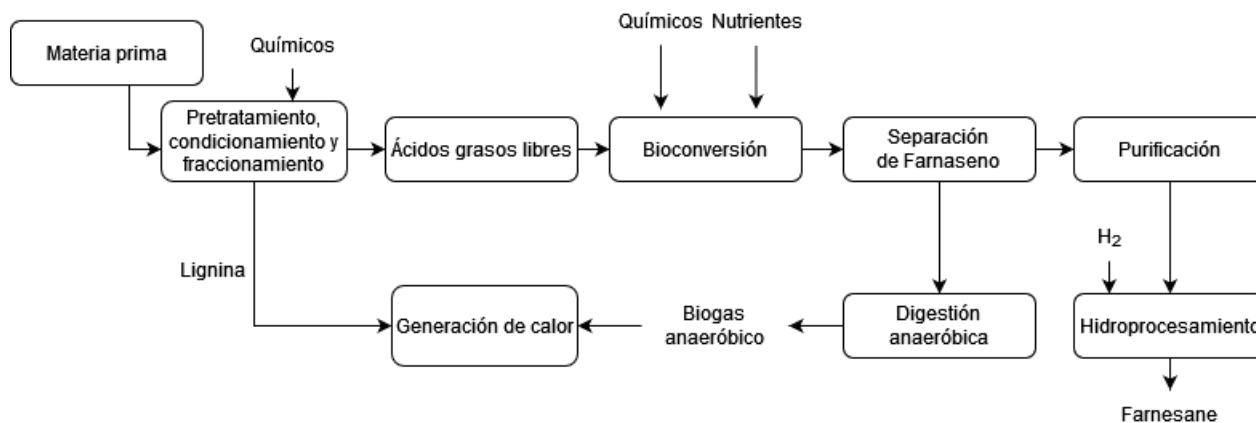


Figura 2.6: Descripción del proceso de conversión de materias primas a *SAF* mediante Iso-Parafinas Sintéticas, elaboración propia.

Los *SAF* producidos por este método de conversión se encuentran regulados por la norma *ASTM D7566*, anexo 3, la cual limita el porcentaje de mezcla entre combustibles fósiles tradicionales y el *SAF* resultante en un máximo del 10 % [11].

2.4.4. Derivados del Alcohol

Las tecnologías usadas para la producción de *SAF* a partir de derivados del alcohol, o *AtJ* por sus siglas en inglés, se basan en un proceso de conversión bioquímica donde alcoholes, como etanol o iso-butanol, son procesados en tres etapas, las cuales corresponden a la etapa de deshidratación, etapa de oligomerización y finalmente una etapa de hidrogenación.

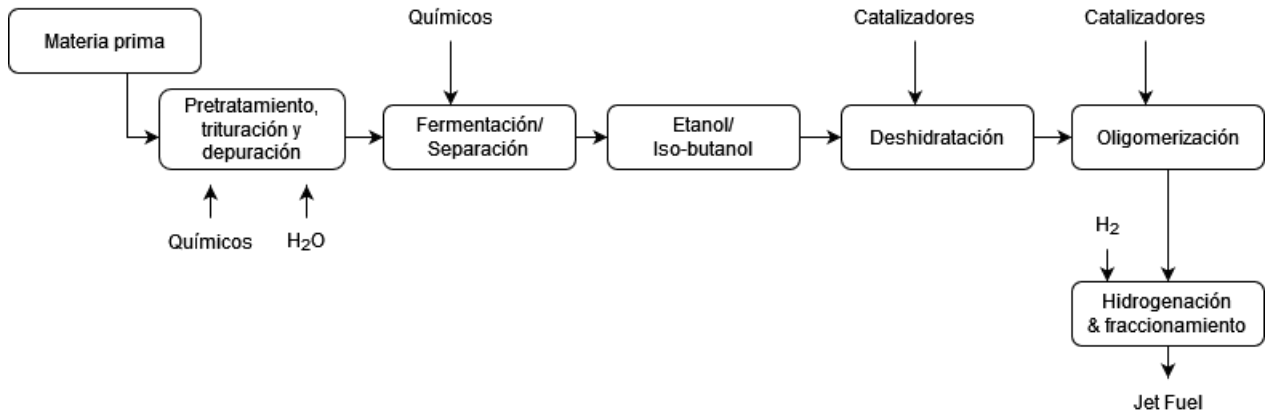


Figura 2.7: Descripción del proceso de conversión de materias primas a *SAF* mediante Alcohol-to-Jet, elaboración propia.

Los *SAF* producidos por este método de conversión se encuentran regulados por la norma *ASTM D7566*, anexo 5, la cual limita el porcentaje de mezcla entre combustibles fósiles tradicionales y el *SAF* resultante en un máximo del 50 % [11].

2.4.5. Hidrotermólisis Catalítica

El proceso de hidrotermólisis catalítica se basa en un proceso hidrotérmico, el cual hace uso de diversas reacción como *cracking*, hidrólisis, descarboxilación, isomerización y ciclización, estos procesos son usados para convertir triglicéridos en una mezcla de hidrocarburos de cadena recta, ramificada y cíclica.

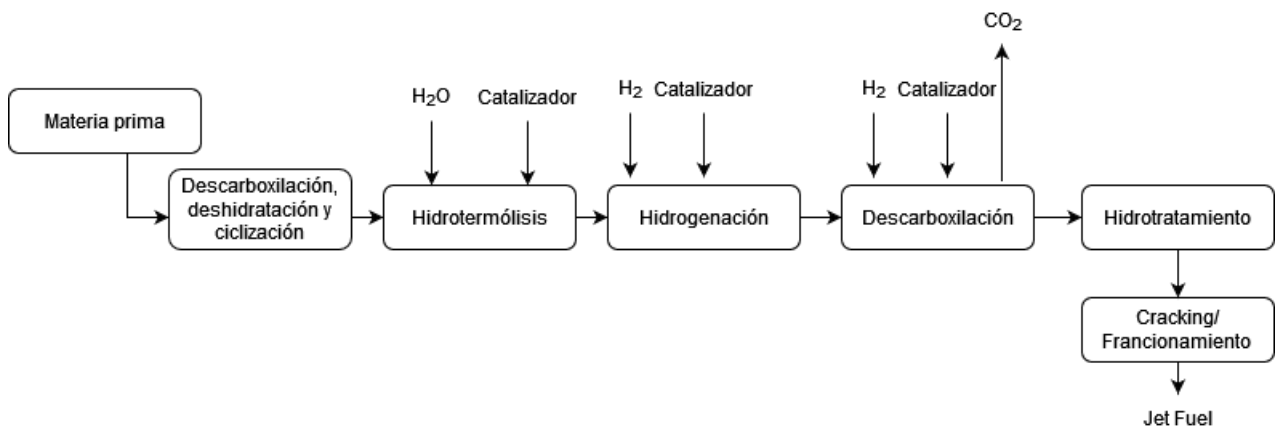


Figura 2.8: Descripción del proceso de conversión de materias primas a *SAF* mediante Hidrotermólisis Catalítica, elaboración propia.

Los *SAF* producidos por este método de conversión se encuentran regulados por la norma *ASTM D7566*, anexo 6, la cual limita el porcentaje de mezcla entre combustibles fósiles tradicionales y el *SAF* resultante en un máximo del 50 % [11].

2.4.6. Derivados del Hidrógeno

Las tecnologías usadas para la producción de *SAF* a partir de derivados del hidrógeno, o *PtL* por sus siglas en inglés, se basan en hacer uso de un proceso de electrolisis, alimentado por electricidad proveniente de energías renovables no convencionales (*ERNC*) para poder separar el hidrógeno presente en el agua del electrolizador. Luego se sintetizan hidrocarburos a partir de hidrógeno y CO_2/CO , donde el CO_2/CO pueden ser obtenidos a partir de diversas fuentes.

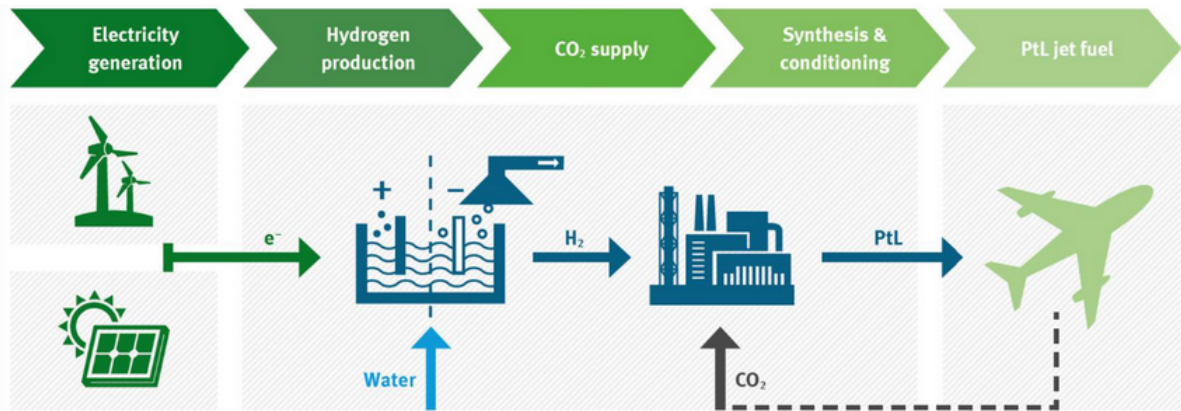


Figura 2.9: Descripción del proceso de conversión de materias primas a *SAF* mediante Power-to-Liquid [16].

Actualmente existen dos métodos de conversión que pueden ser usado para la producción de combustible de aviación basado en un proceso *PtL*, estos métodos corresponden a un proceso basado en tecnologías *FT*, mientras que el segundo corresponde a un proceso basado en el uso de tecnologías de conversión de metanol a combustibles de aviación [17], este último método no cuenta actualmente con aprobación en las normas *ASTM*, mientras que producción de *SAF* mediante el uso de *FT* se encuentra regulada según la norma *ASTM D7566*, anexo 1, en la cual se limita el porcentaje de mezcla entre el *SAF* resultante del proceso y combustibles fósiles tradicionales en un máximo del 50 % [11].

2.5. Materias primas

Las materias primas utilizadas para la producción de *SAF* varían según la tecnología y tipo de conversión escogida para la producción del combustibles, esto debido a que diversas materias primas presentan diversos niveles de eficiencia de conversión de energía.

Actualmente es posible distinguir las distintas materias primas en base a si presentan un potencial inmediato en su uso, o si este potencial uso se proyecta para un futuro cercano. Dentro de las materias primas más comunes en la actualidad se encuentran [18]:

- Residuos solidos municipales: esta materia prima corresponde a los residuos provenientes de los

hogares y empresas, donde se puede tomar como ejemplo los residuos de jardinería, restos de comida y diversos tipos de envases de productos altamente consumidos. Estos residuos pueden ser usados como materias primas en procesos de conversión como FT.

- Residuos celulósicos: esta materia prima corresponde a los desechos, o excedentes en caso de haberlos, de actividades forestales o agrícolas. Estos residuos pueden ser usados como materias primas en procesos de conversión como *FT*, *AtJ* o *SIP*, según el tipo específico de residuo utilizado.
- Aceites de cocina usados: esta materia prima, como su nombre lo indica, corresponde a aceites de cocina reciclados, los cuales pueden ser obtenidos directamente desde la industria alimenticia o mediante labores de recolección en zonas residenciales. Esta materia prima es principalmente utilizada en procesos de conversión como *HEFA*.
- Residuos de la industria ganadera: esta materia prima consiste principalmente en las grasas animales desechadas durante la producción de carne para consumo humano, siendo principalmente usada en procesos de conversión como *HEFA*.
- Cultivos de camelina: esta materia prima corresponde a un cultivo energético con un alto contenido de aceite lipídico, donde su aceite es usado principalmente como materia prima en procesos de conversión como *CHJ*.

Adicionalmente existen una serie de materias primas que presentan un alto potencial para ser usadas en la producción de *SAF* en un futuro:

- Power-to-Liquid (*PtL*): este proceso de producción de *SAF* se basa en el uso de energías renovables, como lo pueden ser las energías solares o eólicas, para la generación de hidrógeno, estas energías alimentan de electricidad un proceso de captura de CO_2 , donde el H_2 generado y CO_2 capturado son procesados y acondicionados mediante *FT* para producir *SAF*.
- Cultivos de alto contenido lipídico: estos cultivos se asocian normalmente a plantaciones de jatrofa, carinata o tung, estos cultivos tienen la capacidad de convertir hasta un 40% de su masa en aceite [18]. Esta materia prima es principalmente propuesta para ser utilizada en procesos de conversión como *CHJ*.
- Cultivos de algas: esta materia prima tiene la ventaja de poder crecer en distintos tipos de climas, ya que resulta altamente favorecidas de crecer en ambientes altos en CO_2 , y presenta el potencial de generar hasta 15 veces más aceites por kilómetro cuadrado que cualquier otro cultivo energético [18]. Esta materia prima es principalmente propuesta para ser utilizada en procesos de conversión como *HEFA*.

A continuación se muestra una tabla resumen de las materias primas y límites de mezcla para 6 de los principales procesos usados para la producción de *SAF*:

Tabla 2.1: Materias primas usadas y limites de mezcla para los seis procesos principales de producción de SAF [11].

| FT-SPK | HEFA-SPK | SIP-HFS | FT-SPK/A | AtJ-SPK | CHJ |
|--|---|---|---|--|--|
| Nombre del proceso | Nombre del proceso | Nombre del proceso | Nombre del proceso | Nombre del proceso | Nombre del proceso |
| Fischer-Tropsch | Ésteres y ácidos grasos hidro-procesados | Iso-parafinas sintéticas | Fischer-Tropsch más aromáticos | Alcohol-to-Jet | Hidrotermólisis catalítica |
| Materias primas/Residuos | Materias primas/Residuos | Materias primas/Residuos | Materias primas/Residuos | Materias primas/Residuos | Materias primas/Residuos |
| Recursos de biomasa sólida: residuos de madera, residuos sólidos urbanos | Aceites de cocina, grasa animal, algas y aceite vegetal | Conversión microbiana de hidrocarburos a partir de azúcares | Residuos sólidos urbanos, residuos forestales | Residuos agrícolas: pajas de cultivos, restos leñosos finos, restos de estiércol | Aceites vegetales, aceites de soja, aceites usados, aceites de algas |
| Límite de mezcla | Límite de mezcla | Límite de mezcla | Límite de mezcla | Límite de mezcla | Límite de mezcla |
| Hasta un 50% | Hasta un 50% | Hasta un 10% | Hasta un 50% | Hasta un 30% | Hasta un 50% |

2.6. Limitación en el uso de nuevos energéticos en la aviación

Si bien a nivel nacional existe un alto interés en mover el sector de transportes hacia el uso de nuevos energéticos, como se evidencia a través de la Estrategia Nacional de Electromovilidad [19] y la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde [20], las cuales buscan impulsar un cambio en la matriz energética del país, favoreciendo el uso de la electricidad y el hidrógeno como fuentes primarias de combustible para Chile, se tienen múltiples limitaciones dentro de la industria de la aviación a la hora de hacer uso de estos nuevos combustibles.

La industria de la aviación se ha identificado como una de las industrias más complejas de descarbonizar mediante el uso de combustibles no basados en hidrocarburos, esto debido a la dificultad asociada a electrificar una aeronave [21] y también a la complejidad intrínseca de desarrollar tecnologías que permitan hacer uso eficiente del hidrógeno [22] como combustible primario. Esto resulta aún más preocupante cuando se considera que en Chile, el transporte de pasajeros presenta cerca de un 96 % de participación mediante el uso de aeronaves del tipo *Medium-haul* y *Long-haul*[23]. Las cuales, debido a su tamaño y rango de vuelo, presentan un horizonte cercano al año 2050 para poder comenzar con su transición a estos nuevos energéticos, según se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2.2: Potencial uso de nuevos energéticos para para distintos tipos de aeronaves y la participación de pasajeros en Chile [23].

| | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 | Participación pasajeros 2019 en Chile |
|-------------|------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| Commuter | SAF | Eléctricos, Celdas hidrógeno o SAF | Eléctricos, Celdas hidrógeno o SAF | Eléctricos, Celdas hidrógeno o SAF | Eléctricos, Celdas hidrógeno o SAF | Eléctricos, Celdas hidrógeno o SAF | Eléctricos, Celdas hidrógeno o SAF | ~0% |
| Regional | SAF | SAF | Eléctricos, Celdas hidrógeno o SAF | Eléctricos, Celdas hidrógeno o SAF | Eléctricos, Celdas hidrógeno o SAF | Eléctricos, Celdas hidrógeno o SAF | Eléctricos, Celdas hidrógeno o SAF | ~0% |
| Short-haul | SAF | SAF | SAF | SAF potencialmente Hidrógeno | SAF e Hidrógeno | SAF e Hidrógeno | SAF e Hidrógeno | 3,6% |
| Medium-haul | SAF | SAF | SAF | SAF | SAF | SAF | SAF potencialmente Hidrógeno | 51,8% |
| Long-haul | SAF | SAF | SAF | SAF | SAF | SAF | SAF | 44,7% |

Por lo anterior es que desde el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones y el Ministerio de Energía, se ha establecido la necesidad de fomentar el uso y producción de *SAF* en Chile, mediante el desarrollo de una hoja de ruta obtenida a través de un proceso participativo denominado Mesa de trabajo público-privada para el desarrollo de Combustibles de Aviación Sostenibles (SAF) [24], de ahora en adelante referido como Mesa SAF en el presente estudio.

2.7. Efectos del uso de SAF en motores

Si bien, la normativa internacional limita que los *SAF* solo pueden ser usados al ser mezclados con combustibles tradicionales aprovechando que la combustión de estos resulta extremadamente similar químicamente, no se debe ignorar que cada método de producción de *SAF* produce un combustible que presenta propiedades físicas distintas a los combustibles tradicionales, las cuales son tomadas en consideración por normativas internacionales debido a consideraciones de seguridad.

Cabe destacar que un cambio en las propiedades físicas del combustible utilizado puede derivar en cambios de rendimiento del motor. Como se evidencia en los estudios realizados por Tan et al. (2013) y Kroyan et al. (2022).

Los resultados mostrados en Tan et al. (2013), indican que al mezclar kerosene de aviación con un biocombustible obtenido a partir de aceites de cocina usados, se tiene un aumento en el empuje generado por el motor y una disminución en el consumo de combustible [25].

Adicionalmente, en el mismo estudio, se presentan las emisiones medidas de diversos gases nocivos durante la combustión del kerosene de aviación y el biocombustible, los gases medidos corresponden a los hidrocarburos sin quemar (*HC*), monóxido de carbono (*CO*), dióxido de carbono (*CO₂*) y óxidos nitrosos (*NO_x*) generados. Donde se indica que las emisiones de *HC* durante la combustión del biocombustible resultan extremadamente bajas en comparación con el combustible tradicional, llegando a presentar una reducción del 93% relativo a las emisiones del kerosene[25]. De igual forma se detecto que el biocombustible emite una menor cantidad de *NO_x*, con una emisión casi nula de

NO_2 [25].

Considerando el trabajo realizado por Kroyan et al. (2022), donde se evalúan propiedades como la viscosidad, densidad, poder calorífico inferior, en términos de masa y volumen, y el contenido de carbono e hidrógeno presente en una variedad de *SAF* estudiados, es posible obtener una aproximación inicial sobre el rendimiento en términos de consumo de combustible y energía. Los *SAF* estudiados por Kroyan et al. corresponden a los siguientes:

- HDO: *SAF* producido a partir de un proceso de hidrotermólisis catalítica con hidro-desoxigenación.
- HEFA-RD: Producido mediante un proceso *HEFA* a partir de biodiésel.
- SKA: Kerosene sintético con aromáticos.
- CH-SKA: Kerosene sintético con aromáticos, producido mediante hidrotermólisis catalítica.
- C-HRK: *SAF* producido mediante el hidro procesamiento de camelina.
- CH-SK: *SAF* producido mediante hidrotermólisis catalítica.
- C-SPK: *SAF* producido a partir de camelina.
- J-SPK: *SAF* producido a partir de jatrofa.
- C-HEFA: *SAF* producido mediante un proceso *HEFA*, haciendo uso de camelina como materia prima.
- M-SPK: *SAF* producido a partir de micro algas.

A partir de los resultados mostrados por Kroyan et al., se tiene que las propiedades que mayor efecto tienen sobre el consumo de combustible del motor corresponden a la densidad, el poder calorífico inferior por unidad de volumen, y el contenido de carbono en el combustible, indicando que el aumento en una o más de estas propiedades resulta, generalmente, en una reducción del consumo de combustibles. A su vez, el aumento de valor en propiedades como el contenido de hidrógeno y el poder calorífico inferior por unidad de masa, tienden a mostrar un efecto negativo en torno al consumo de combustible.

De manera general se tiene que, los *SAF* presentan un consumo de combustible volumétrico (FC_{vol}) un 3,43% mayor que el medido para el *Jet Fuel A-1*, mientras que si se considera el consumo de combustible másico (FC_{mass}) los *SAF* presentan una disminución promedio del $-1,31\%$ comparado con los combustibles tradicionales [26]. También se tiene que el consumo energético de *SAF* es casi idéntico comparado con el combustible tradicional, presentando una variación promedio de $+0,0015\%$ [26]. Al considerar las emisiones de los *SAF* estudiados por Kroyan et al., se tiene que las emisiones de CO_2 emitidas durante la combustión son en promedio un 2,32% menores que las emitidas por combustibles tradicionales.

3. Metodología

En el presente trabajo se realiza una serie de investigaciones bibliográficas con el objetivo de determinar las materias primas disponibles en Chile para la producción de *SAF* (con su respectiva disponibilidad por región), las tecnologías y métodos de conversión que mejor se adapten a las materias primas disponibles, y finalmente se elaborará, mediante el uso de matrices de decisión, una clasificación de las tecnologías que mejor se adapten a la producción de *SAF*.

A continuación se muestra la metodología a seguir para lograr los objetivos antes mencionados.

3.1. Investigación de Materias Primas en Chile

3.1.1. Investigación de Estándares de Sustentabilidad

Con el fin de poder determinar que materias primas, para la producción de *SAF*, se encuentran disponibles en el territorio nacional es necesario definir cuales son los requisitos para que una materia prima sea considerada como sustentable, lo que se traduce en una investigación bibliográfica para definir los estándares mínimos acordados por organizaciones internacionales y aceptados por la industria, eliminando del universo de estudio cualquier materia prima que no cumpla con los estándares de sustentabilidad establecidos mediante este proceso de investigación.

Esta investigación se lleva a cabo, mediante la revisión de documentación presente en publicaciones de organizaciones internacionales, como la *OACI*, con especial foco en acuerdos internacionales como lo es *CORSIA*.

3.1.2. Identificación de Materias Primas

En base a los resultados de la investigación previamente realizada se procede a investigar, e identificar, la mayor cantidad de materias primas que cumplan con los establecidos. Las materias primas identificadas son agrupadas según su método de obtención, como por ejemplo si corresponde a material lignocelulósico, cultivos energéticos, desechos sólidos, desechos de la industria ganadera, aceites reciclados, etc.

Esta identificación es llevada a cabo mediante la revisión bibliográfica de distintas publicaciones relacionadas a materias primas de *SAF*, publicadas por organizaciones internacionales, gobiernos o empresas privadas, donde identifican, y categorizan, las distintas materias primas estudiadas.

3.1.3. Investigación Centrada en Chile

Una vez identificadas, y categorizadas, las diversas materias primas se procede a la realización de una investigación de disponibilidad de estas en el territorio nacional. Estableciendo un listado de las materias primas con potencial de ser usadas para la producción de *SAF* presentes en Chile, y estableciendo una cantidad estimada de estas materias primas.

Este proceso de investigación es realizado mediante la revisión bibliográfica de estudios previos de disponibilidad en Chile de las materias primas identificadas, entrevistas (o reuniones) con académicos expertos en estas materias primas, con especial foco en publicaciones y académicos cuyos estudios se hayan centrado en la disponibilidad de estas materias primas con objetivos distintos a la producción de biocombustibles. De manera paralela se lleva a cabo un proceso de revisión bibliográfica enfocado en el sector privado, revisando patentes y publicaciones de privados centradas en las materias primas para la producción de biocombustibles en Chile.

3.2. Investigación de Tecnologías

3.2.1. Identificación de Tecnologías

Mediante un proceso de revisión bibliográfico se identifican y recopilan las tecnologías actualmente usadas para la producción de *SAF* que se encuentren aprobadas por normas internacionales, principalmente normas *ASTM*. Adicionalmente se identifican tecnologías en proceso de aprobación que tengan un alto potencial de ser usadas en Chile.

Esta revisión bibliográfica se basa en la documentación presentada por la *OACI* en diversas publicaciones, además de bibliografía obtenida de manera independiente.

3.2.2. Selección de Tecnologías

A partir de las tecnologías y procesos de conversión usados para la producción de *SAF*, que son identificadas mediante la revisión de antecedentes y cuentan con aprobación para su uso según normas internacionales, se realiza un proceso de emparejamiento entre las materias primas identificadas en el territorio nacional y los procesos de conversión que permiten el uso de estas materias primas.

Este proceso de emparejamiento resulta en una lista comprensiva de las tecnologías, o procesos de conversión, que presentan el potencial de usar una o más materias primas, disponibles en Chile, para producir *SAF*.

3.2.3. Establecer Matrices de Decisión

En base a los emparejamientos realizados se realiza un proceso de investigación bibliográfica, enfocada en las tecnologías, o procesos, que aprovechen una, o más, de las materias primas, esta investigación se realiza con el fin de establecer indicadores que permitan asistir en la confección de una matriz de decisión para poder evaluar cualitativamente cada combinación, de materia prima y tecnología, que permite generar *SAF* en Chile.

Finalmente estos indicadores son usados para establecer las tecnologías y procesos de conversión que mejor se adecuan a las materias primas disponibles en Chile.

4. Resultados

En la presente sección se muestran los resultados de la participación en diversas sesiones de la Mesa *SAF*, las investigaciones realizadas en torno a las materias primas y las tecnologías usadas para la producción de *SAF*. Para la Mesa *SAF* se exponen y resumen los datos presentados en diversas sesiones que resultan relevantes para este estudio, en cuanto a la investigación en torno a las materias primas se muestran las diversas materias primas identificadas en Chile, mientras que para la investigación de tecnologías se explica como se seleccionaron las tecnologías relevantes a nivel nacional.

Finalmente se muestra una propuesta de matriz de decisión considerando una combinación entre las materias primas y tecnologías previamente seleccionadas, enfocándose en proponer una jerarquía de decisión enfocada en Chile.

4.1. Mesa SAF

Dentro del proceso de investigación de este estudio se participa en múltiples sesiones de la Mesa *SAF*, de las cuales es posible extraer una gran cantidad de datos relevantes enfocados en la realidad nacional. Dónde es necesario destacar la información obtenida en las sesiones N°2, N°3 y N°4 [24].

4.1.1. Segunda sesión Mesa SAF

Esta sesión tiene como foco el interés y los desafíos de importadores, productores, refinerías y distribución/abastecimiento de *SAF* [27], donde se rescata principalmente las presentaciones [28] de:

- Rendering: Empresa nacional líder en reciclaje y purificación en aceites vegetales usados, representados por su gerente general, Joaquín Aguirre.
- HIF Global: Empresa líder mundial en *eFuels*, representados por su subgerente comercial, Adam Pedinian.

En la presentación de la empresa Rendering se destaca el potencial que existe actualmente en cuanto al uso de aceites vegetales usados como materia prima para la producción de *SAF*, indicando que a la fecha poseen una participación cercana al 70% en el mercado de aceites reciclados en Chile, cubriendo desde Arica a Punta Arenas [28]. Actualmente se recolectan aproximadamente unas 700 toneladas de aceites reciclados al mes, manteniendo una red que bordea los 15 mil clientes activos, los cuales varían entre restaurantes e industrias, como lo son Tika y Evercrisp [27].

Al ser consultados acerca de sus proyecciones en cuanto al crecimiento de Chile y su capacidad para capturar aceite, se indica que el crecimiento en la generación y recolección de aceites vegetales usados se encuentra directamente alineado con el crecimiento del país, por lo que se estima que las cuotas de recolección de aceite se dupliquen en un futuro próximo, esto sin considerar que al día de hoy las cifras relacionadas al consumo domiciliario son casi nulas, por lo que al considerar este consumo dentro de un esquema de reciclaje se esperaría un aumento aún mayor que el estimado [27].

El foco de la presentación de HIF Global se centra en torno a la producción de combustibles sintéticos, o *eFuels*, como alternativa a la electromovilidad. En particular se habla de las ventajas que presenta Chile respecto al valor de la energía eléctrica a partir de fuentes de ERNC, enfocando la disponibilidad de recursos naturales como lo son el recurso eólico y solar [27].

Desde HIF Global indican que, si bien la energía eólica en la región de Magallanes resulta marginalmente más costosa que la energía solar que pudiera ser obtenida en la zona norte del país, se prefiere optar por plantas pilotos que hagan uso del recurso eólico considerando que al ser más estable que su contra parte solar requiere menos infraestructura de almacenamiento [27]. Por lo que actualmente cuentan con dos proyectos pilotos para la producción de *eFuels*, ambos ubicados en la región de Magallanes.

4.1.2. Tercera sesión Mesa SAF

La tercera sesión de esta mesa continua con el foco propuesto por la sesión anterior, el cual busca exponer el interés y los desafíos de importadores, productores, refinerías y distribución/almacenamiento de *SAF* [27, 29], donde se rescatan las presentaciones realizadas por [30]:

- Corporación Chile de la Madera (*CORMA*): *CORMA* es una asociación gremial que reúne a más de 190 actores del sector forestal, dando representación a la cadena forestal completa, desde viveros hasta exportaciones. Durante la sesión presenta el gerente de estudios, Andrés Meneses.
- NESTE: Empresa de energía europea enfocada en la producción de combustibles sostenibles, siendo el mayor productor de *SAF* a nivel global. Representados por Oscar García y Charlotte Lollard.
- Universidad Católica de la Santísima Concepción (*UCSC*): Universidad birregional ubicada en las regiones del Biobío y Ñuble. Representada por Ana Narváez.

Desde *CORMA* mencionan el potencial de Chile en términos de la disponibilidad de biomasa forestal sólida que pudiera ser usada para la producción de *SAF*, dónde destacan tres fuentes de las cuales es posible extraer esta biomasa, según se puede observar en la tabla 4.1. Considerando que la biomasa provenientes de bosques nativos presenta el mayor potencial entre las tres fuentes mencionadas, se indica que un 30 % del bosque nativo en Chile se ubica en áreas silvestres protegidas por el estado, mientras que un 14 % se encuentra en áreas silvestres protegidas por privadas [29]. Del 56 % de bosque nativo restante es posible identificar 12 tipos forestales, de los cuales 7 se excluyen del manejo por ser especies protegidas, dejando finalmente un 27 % del bosque nativo disponible para su manejo, equivalente a unas 3,9 millones de Ha [29].

Tabla 4.1: Datos presentados por *CORMA* durante la tercera sesión de la Mesa SAF [30].

| Fuente | Disponibilidad estimada |
|-------------------------|------------------------------|
| Bosque nativo | 14,7 millones de Ha |
| Plantaciones | 2,3 millones de Ha |
| Subproductos de aserrío | 5,4 millones de m^3 al año |

NESTE destaca como la empresa líder en producción de *SAF* a nivel global [30], en su presentación hacen mención a las diversas materias primas a partir de las cuales están produciendo *SAF* en la actualidad, donde entran las grasas de origen animal, aceites de cocina reciclados y otros residuos provenientes de procesamiento de alimentos o aceites [30]. Adicionalmente hacen mención a materias primas cuyo uso se ve factible dentro de un corto a mediano plazo, dentro del corto plazo se tienen las materias primas lignocelulósicas y desechos sólidos municipales, mientras que ya mirando un horizonte de tiempo más amplio se ve el potencial uso de materias primas como algas o energía eléctrica, haciendo referencia en esta última a tecnologías *Power-to-X*[29, 30].

Finalmente la *UCSC* comenta que desde el Centro de Energía de la universidad hay iniciativas en curso, como la iniciativa *e-Bio fuels*, enfocadas en el uso de hidrógeno verde y biomasa para la producción de combustibles[29]. Dónde cuentan con una planta piloto de producción de hidrógeno verde y una línea de producción de combustibles en base a biomasa, la cual es capaz de generar combustible para su uso en transporte mediante tecnologías basadas en pirólisis.

4.1.3. Cuarta sesión Mesa SAF

Esta cuarta sesión se lleva a cabo para enfocar la discusión en temas relacionados con los intereses y desafíos de la regulación, certificaciones e investigación asociados a los combustibles de aviación sostenibles [31], donde se rescatan las presentaciones realizadas por [32]:

- Pontificia Universidad Católica (*PUC*): Representada por el profesor asistente de la escuela de ingeniería, Felipe Huerta.
- Universidad de Concepción (*UdeC*): Representada por los profesores Andrés Mejías y Cristina Segura.

En la presentación de la *PUC* se destaca el *SAF* como una solución versátil al problema de la descarbonización de la aviación en el corto a mediano plazo, considerando que no se requiere ningún cambio estructural en los aviones actuales para poder hacer uso de estos combustibles, los cuales pueden ser producidos a partir de fuentes tan diversas como biomasa o energía eléctrica [31]. A su vez exponen algunas de las problemáticas asociadas a la producción de *SAF*, como lo son los problemas asociados a los altos costos económicos de algunas materias primas, o tecnologías de conversión [31, 32], también se hace mención a problemas intrínsecos asociados a la sostenibilidad de ciertas materias primas, las cuales podrían resultar dañinas para el medio ambiente o pueden implicar el uso de suelos con riesgo de deforestación [31].

Expandiendo en los beneficios de los *SAF*, se menciona como punto clave que la combustión de *SAF* produce mucho menos emisiones de óxidos nitros (NO_x) y una cantidad considerablemente

menor de material particulado que la combustión de kerosene [31]. A partir de lo anterior, se indica que la reducción de emisiones de CO_2 para los *SAF* no ocurre durante la combustión, si no que se encuentra ligada a los procesos de producción y obtención de las materias primas utilizadas [31, 33], donde se aprovecha de destacar que este no es el caso para los combustibles basados en hidrógeno, por lo que a largo plazo el hidrógeno líquido (LH_2) permitiría una industria con emisiones netas cero [31].

Desde la *UdeC* mencionan que a la fecha, las tecnologías más desarrolladas para la producción de *SAF* son las que presentan mayor restricciones a la hora de considerar que materias primas pueden ser utilizadas en su producción [31]. Por lo anterior, el foco de investigación de la institución se centra en poder hacer uso de materias primas como alcoholes, que son más abundantes, y materiales reciclados.

Adicionalmente, destacan tres fuentes de materias primas poco explotadas en Chile, enfocadas en biomasa forestal y residuos [31, 34]:

- Lignocelulosa: Se estiman que existen cerca de 9,5 millones de toneladas secas al año que no se están utilizando.
- Desarrollo de plantaciones dendroenergéticas: Se estima que al hacer uso de plantaciones de corta rotación existe un potencial de 9 mil hectáreas disponibles que pudieran servir para la producción de biomasa dedicada a *SAF*, las cuales se encuentran entre las regiones del Maule y Aysén.
- Uso de plásticos residuales y neumáticos fuera de uso (*NFU*): Se indica que gran parte de los plásticos residuales y *NFU* no pueden ser reciclados mediante procesos mecánicos, por lo que podrían tener potencial de ser usados para producción de *SAF* mediante procesos de pirólisis.

La *UdeC* indica que, ya cuenta con la infraestructura necesaria para trabajar procesos termoquímicos de conversión de biomasa, en particular se destaca la conversión de biomasa basada en procesos de pirólisis, y procesos de gasificación y torrefacción [31]. Para la conversión de biomasa basada en procesos de pirólisis, se muestra con gran potencial la posibilidad de aprovechar los *NFU* generados por la industria minera deben reciclar según lo indica la Ley REP [31, 35].

Tabla 4.2: Datos presentados por *UdeC* durante la cuarta sesión de la Mesa SAF [32].

| Fuente | Disponibilidad estimada |
|----------------------|------------------------------|
| NFU | 140.000 toneladas al año |
| Plásticos residuales | 1 millón de toneladas al año |

4.2. Materias primas

A continuación se muestran los resultados asociados a la identificación de materias primas dentro del territorio nacional, indicando las regiones donde es posible encontrar estas materias primas, su disponibilidad estimada y una comparación cualitativa de sus respectivas ventajas y potenciales desventajas.

Con el fin de facilitar la clasificación de las diversas materias primas identificadas en este estudio, se decide dividir el territorio nacional en cinco macro zonas, las cuales agrupan las diferentes regiones del país:

- Zona 1: Zona que abarca entre la región de Arica y Parinacota y la región de Antofagasta.
- Zona 2: Zona que abarca entre la región de Atacama y la región de Coquimbo.
- Zona 3: Zona que abarca entre la región de Valparaíso y la región del Maule.
- Zona 4: Zona que abarca entre la región de Ñuble y la región de Los Lagos.
- Zona 5: Zona que abarca entre la región de Aysén y la región de Magallanes.

A partir de una extensa revisión bibliográfica, la participación activa en diversas sesiones de la Mesa SAF y entrevista realizadas a diversos expertos nacionales, se han logrado identificar las siguientes materias primas presentes en Chile:

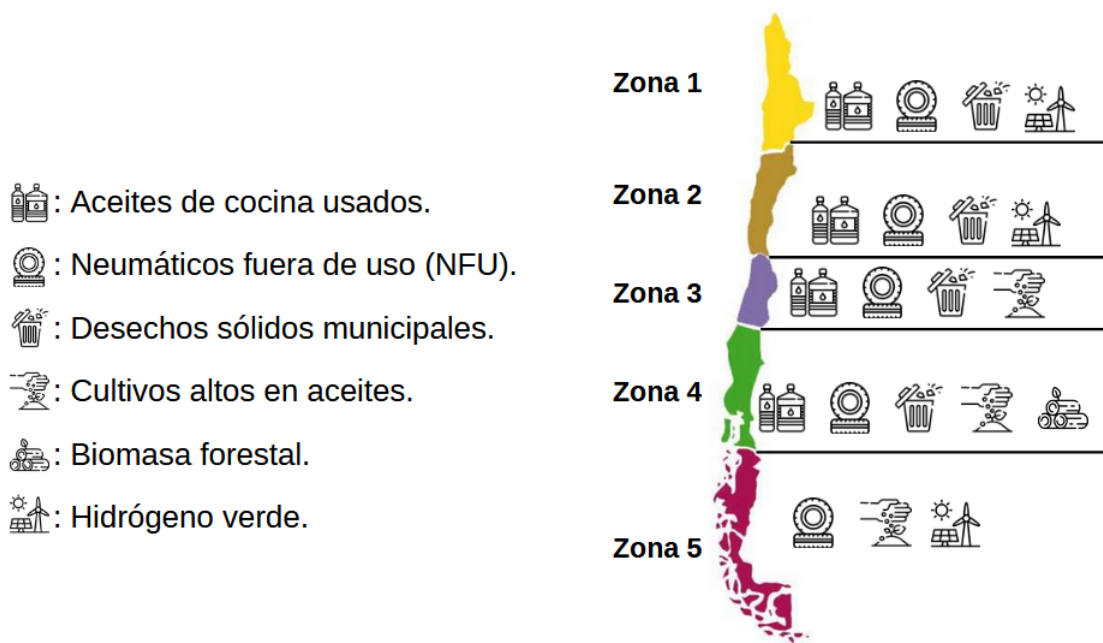


Figura 4.1: Mapa resumen mostrando la distribución aproximada de materias primas en Chile, elaboración propia.

4.2.1. Aceites de cocina usados

Según datos emitidos por Odepa, durante el año 2021 se comercializaron aproximadamente unas 447.000 toneladas de aceites de cocina en Chile [36]. Sí consideramos que estos aceites presentan una valorización de 2,1%, según lo indicado en el Sexto Reporte del Estado del Medio Ambiente [37], se tiene un estimado de 9.387 toneladas de aceites que pueden ser recicladas en productos finales como compost, lubricantes, ceras, pinturas y biodiésel.

A partir por lo expuesto por la empresa Rendering, se estima que Chile cuenta con una producción anual de 8.400 toneladas de aceite al año que puede ser usada para la producción de SAF [27].

Considerando que Rendering cuenta con una participación de mercado cercana al 70 % en Chile se puede extrapolar que la producción total anual de aceite de cocina reciclado que pudiera ser usado para producción de *SAF* es cercana a unas 12.000 toneladas al año.

Debido a que las fuentes de generación de los aceites usados provienen principalmente de restaurantes e industrias productoras de alimentos, se tiene la presencia de focos de recolección en 4 de las zonas presentes en este estudio, descartando la presencia significativa en la Zona 5 debido a factores logísticos.

Adicionalmente, se debe tener en consideración que la empresa Rendering exporta un 95 % de su producción a Europa para ser usada como materia prima de biocombustibles de alta calidad [28], lo cual podría derivar en un escenario donde cerca del 70 % de la producción de aceites en Chile no pudiera ser aprovechado dentro del territorio nacional.

4.2.2. Neumáticos fuera de uso

Mediante la información obtenida a partir de la participación en diversas sesiones de la Mesa SAF, en conjunto con información recopilada durante la entrevista realizada a la Dra. Cristina Segura en el marco de esta investigación, se ha podido identificar que en Chile existe un potencial uso para desechos como lo son los neumáticos fuera de uso (*NFU*) y ciertos tipos de plásticos residuales, los cuales no pueden ser reciclados mediante procesos mecánicos, por lo que la opción de tratar estos materiales mediante procesos químicos resulta como una vía alternativa para su reciclaje.

A partir de la información recopilada, se tiene un estimado de producción de 140.000 toneladas de *NFU* al año, donde un volumen importante de estos neumáticos proviene directamente de la actividad minera en Chile. Una de las principales características que presentan los *NFU* corresponde a la alta densidad de hidrocarburos presentes en el material, favoreciendo la logística de transporte tanto de la materia prima como del combustible producido [38].

Considerando que en Chile, la Ley REP establece en sus metas llegar a reciclar un 100 % de los neumáticos provenientes del rubro minero [35]. Esto genera la necesidad de identificar maneras de aprovechar estas materias primas, apareciendo la posibilidad de hacer uso de procesos basados en pirólisis para la producción de combustibles como una alternativa llamativa a nivel nacional.

4.2.3. Desechos sólidos municipales

El Estado de Chile, mediante el Ministerio de Medio Ambiente (MMA), define los desechos sólidos municipales como los residuos sólidos domiciliarios y residuos generados en el sector servicios y pequeñas industrias, donde también se incluyen los residuos derivados del aseo de vías públicas, áreas verdes y playas [39]. En resumen, un desecho sólido municipal corresponden a los residuos municipales producidos por una comuna y gestionada su recolección por el municipio.

Haciendo uso de la definición anterior es posible suponer que estos desechos pueden encontrarse a lo largo de todo el territorio nacional, aunque en cantidades variantes según la densidad poblacional de cada zona. A partir de un estudio publicado por el MMA el año 2020, se estima que en Chile se

produjeron cerca de 19,6 millones de toneladas de residuos sólidos de todo tipo durante el año 2018 [39].

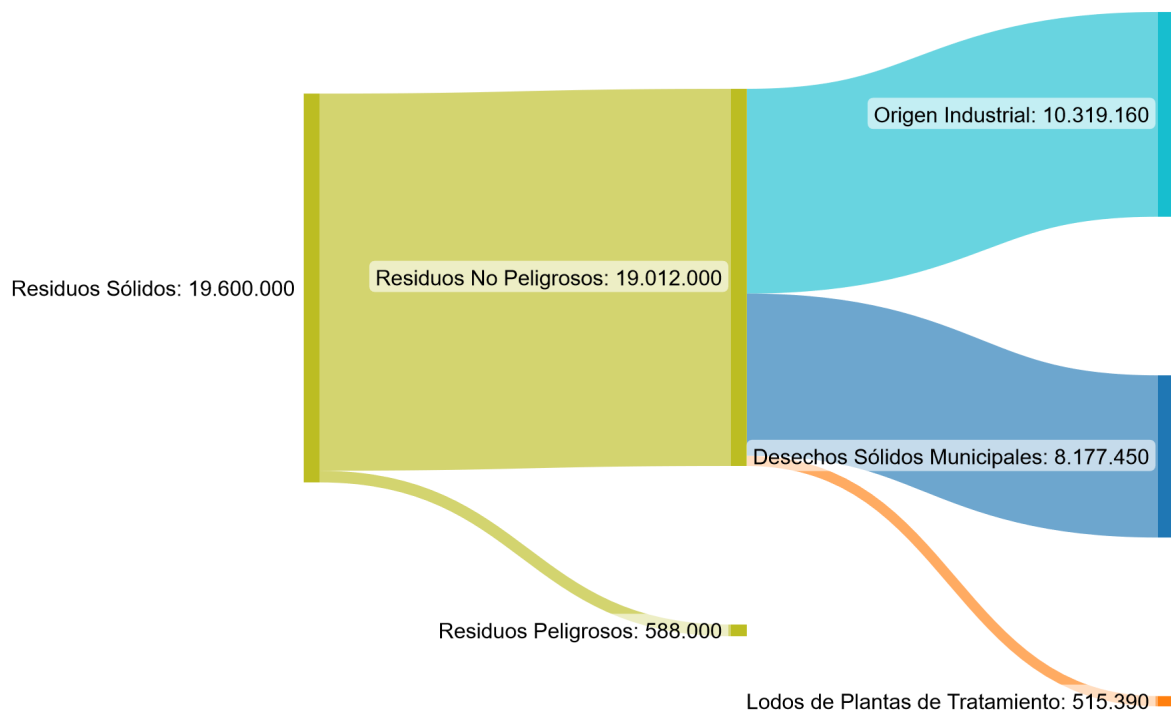


Figura 4.2: Distribución estimada de las toneladas de desechos sólidos producidos en Chile, elaboración propia basados en datos del MMA[39].

De las 8 millones de toneladas de desechos sólidos municipales producidas durante el año 2018, un 99% de estos desechos es destinado a ser eliminados, y solo un 1% presenta una valorización posterior, dejando actualmente una disponibilidad cercana a las 81.774 toneladas de desechos sólidos municipales.

A partir de la información reportada el año 2018 en SINADER, se tiene que en promedio se generan 1,19 kilos de desechos al día por habitante, es la Región Metropolitana donde se concentra un 44,9% de estos residuos, seguida por las regiones de Valparaíso con un 10,6%, Biobío con un 9,3% y Coquimbo con un 5,2% [39]. En el anexo A.1 es posible encontrar la información anterior en mayor detalle.

Debido a que la densidad poblacional en la Zona 5 resulta ser de las más bajas en todo Chile, se estima que no existe generación útil de desechos sólidos municipales que puedan ser usados para la producción de SAF. Adicionalmente, se tiene que existe una gran concentración de esta materia prima en las Zonas 3 y 4, debido a la densidad poblacional presente en estas zonas, además de la población flotante que pueden recibir durante diversas épocas del año.

4.2.4. Cultivos altos en aceites

Si bien, durante las diversas sesiones de la Mesa SAF no se ha hecho mención de los cultivos altos en aceites como foco de interés, de los actores privados y públicos, como una posible fuente de materias primas en Chile, pero diversas fuentes indican que estos cultivos presentan un alto potencial como fuente viable y sostenible para la producción de *SAF* [18, 23, 40, 41].

A partir de reuniones sostenidas con la empresa Smarth Earth Camelina Chile y expertos del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), se ha identificado que los cultivos altos en aceites se encuentran presentes en Chile y cuentan con el potencial de ser usados para la producción de *SAF* en el mediano a largo plazo [42, 43], destacando en particular los avances y propuestas en torno al cultivo de camelina como materia prima en la zona centro-sur de Chile.

Desde Smarth Earth Camelina se indica que en Chile ya existe producción de camelina en baja escala, considerando estos primeros cultivos como pruebas de mercado. Al día de hoy existe 146 Ha de camelina plantadas, abarcando desde la región del Maule hasta Magallanes, la cual presenta un rendimiento promedio de 900 kg por Ha [42]. Parte de esta producción corresponde a plantaciones de pruebas para nuevas variedades de camelina que se están desarrollando en conjunto con INIA, con el objetivo de desarrollar variedades de camelina mejor adaptadas a condiciones climáticas como las que son posible encontrar entre las regiones del Maule y Magallanes, correspondientes a las zonas N°3, N°4 y N°5, lo cual indica el potencial en Chile para expandir la cantidad de Ha de camelina plantada de manera considerable.

4.2.5. Biomasa forestal

La biomasa forestal es uno de los principales recursos expuestos durante diversas sesiones de la Mesa SAF, donde diversas instituciones publicas y privadas han mostrado un gran interés en poder estudiar la posibilidad de explotar fuentes de biomasa provenientes de residuos del aserrío, cultivos dendroenergéticos y bosque nativos.

Desde instituciones como CORMA, indican que entre las regiones de Aysén y Los Lagos es posible explotar cerca de 3,9 millones de *Ha* de bosque nativo, el cual aseguran que es posible explotar de manera sostenible [29, 30]. Dentro de estas *Ha* sería posible explotar especies como Siempreverde, Lengua, Roble-Raulí-Coigüe, Coigüe de Magallanes y Coigüe-Raulí-Tepa.

Al considerar posibles limitaciones que se pueden encontrar en cuanto al transporte de materias primas desde la Zona 5 a otras zonas del país, se ha decidido no considerar el potencial bosque nativo en la región de Aysén como una alternativa factible para la producción de *SAF*.

Existen múltiples estudios para la Zona Centro-Sur de Chile que indican que existe un alto potencial en la explotación de bosques nativos y plantaciones dendroenergéticas [44, 45]. En particular se tienen que son las regiones de Los Ríos y Los Lagos, pertenecientes a la Zona 4, donde se encuentran las provincias con mayor cantidad de biomasa disponible. En el anexo A.2 es posible encontrar la información presentada en mayor detalle.

Tabla 4.3: Biomasa disponible estimada en la zona centro-sur, 2015 [45].

| Provincia | Biomasa total disponible (Toneladas) |
|-----------|--------------------------------------|
| Malleco | 3.624.526 |
| Cautín | 7.840.798 |
| Valdivia | 7.073.081 |
| Ranco | 7.135.020 |
| Osorno | 5.502.724 |
| Total | 31.176.149 |

Desde el Gobierno Regional de Los Ríos, estiman que la región presenta un flujo potencial de biomasa forestal a partir de bosque nativo, de 1.892.260,5 toneladas secas al año, de las cuales 968.137 TS/año se encuentran en estructuras boscosas catalogadas como renovales [44]. Al considerar que se puede hacer uso de los desechos provenientes de aserraderos de la región, se tiene un potencial estimado de 267.300 toneladas secas al año que podría ser utilizado en la producción de *SAF*, este potencial proviene de 140 industrias primarias forestales donde es Arauco la empresa con mayor aporte unitario, ubicado en la comuna de Mariquina [44].

Tabla 4.4: Origen de los residuos forestales disponibles para la producción de *SAF* [44].

| Origen de los residuos | Biomasa estimada [TS/año] |
|------------------------|---------------------------|
| Pymes | 124.830 |
| Gran empresa | 142.500 |

4.2.6. Hidrógeno verde

Se ha decidido considerar en este estudio la producción de hidrógeno a partir de fuentes de energías limpias, como la energía eólica y solar, como una fuente potencial para la obtención de materias primas enfocadas en la producción de *SAF*, esto a partir de lo presentado por la empresa HIF Global y el profesor Felipe Huerta, en la segunda y cuarta sesión de la Mesa *SAF*, respectivamente.

Chile ya cuenta con un extenso plan para poder posicionarse como uno de los mayores productores de hidrógeno verde (H2V) a nivel global, lo cual se evidencia en la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde[20]. Para esto se planea aprovechar la alta disponibilidad de recursos energéticos renovables, expuestos en la figura 4.3, llegando potencialmente a un total energético acumulado de más de 1.800 GW. Por lo que la producción de *SAF* a partir de procesos como *Power-to-Liquid* cuenta con posibles ventajas estratégicas a nivel global. Adicionalmente se tiene que dentro del territorio nacional, debido a la gran presencia de la industria minera Chile no presenta problemas en encontrar fuentes de captura de CO_2 para ser usado en los procesos de producción de *e-Fuels*.

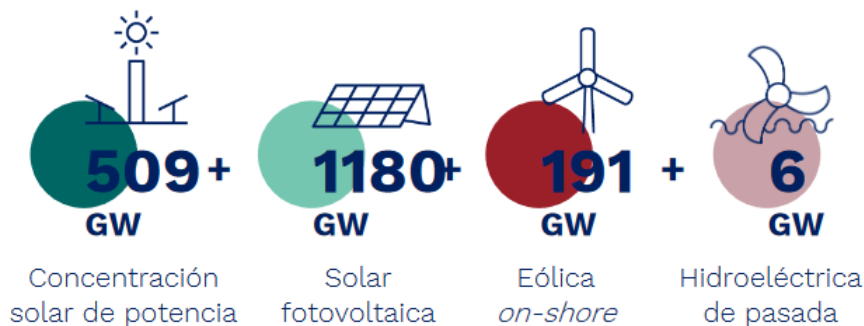


Figura 4.3: Disponibilidad energética potencial de recursos renovables estimada para la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, 2020.

Desde HIF Global, se ha indicado la existencia de ya dos plantas pilotos destinadas a la producción de estos combustibles sintéticos, ambas ubicadas en la región de Magallanes [27, 28], ubicada en la Zona 5. Se ha identificado que la plantas de producción de *e-Fuels* favorecen la estabilidad del recurso, en cuanto a su disponibilidad, sobre el costo de la producción eléctrica del mismo, esto debido a que un recurso energético que presente mayor variabilidad en su disponibilidad, o intensidad, requiere de una infraestructura de almacenamiento más robusta aumentando así el costo de plantas modulares o de tamaños reducidos [27].

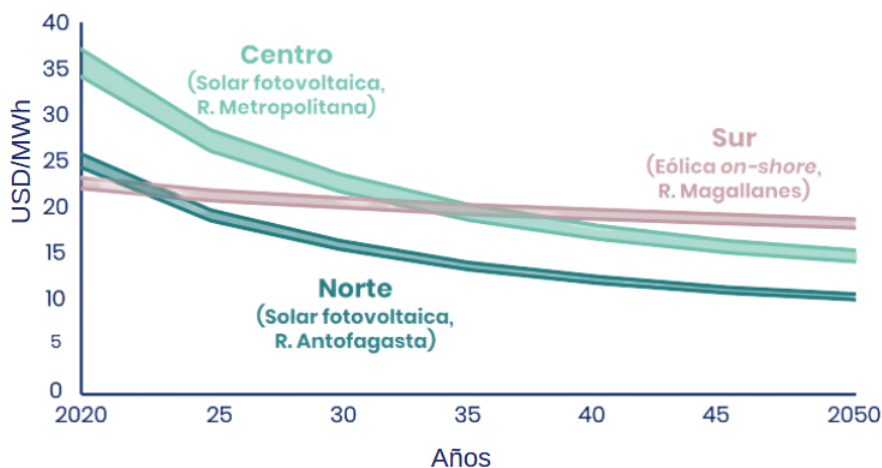


Figura 4.4: Costo nivelado de electricidad renovable estimado en la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, 2020.

A su vez, considerando que actualmente existe un amplio desarrollo enfocado en generar tecnologías que permitan hacer uso del hidrógeno como combustibles primario en diversos medios de transporte, incluidas aeronaves de gran tamaño para el año 2050 [23, 41, 46], se presenta en Chile la oportunidad de desarrollar un mercado en base a la producción de *SAF* a partir de H2V y en simultaneo se comienza a preparar a largo plazo la infraestructura nacional para recibir y operar aeronaves que puedan operar directamente con hidrógeno [31].

4.3. Tecnologías de conversión

Durante el presente estudio se han estudiado con principal atención las tecnologías aprobadas en las normas *ASTM D7566* y *ASTM D1655*, las cuales se consideran por la *OACI* como los únicos procesos de conversión aprobados para la producción de *SAF* [6, 12]. De manera excepcional, se añade al estudio tecnologías basadas en procesos de pirólisis, en base a la información obtenida durante la entrevista realizada a la Dra. Cristina Segura [38] y teniendo en considerando que estas tecnologías se encuentran en proceso de aprobación según se indica en documentos publicados por la *OACI* [47].

A partir de la revisión bibliográfica realizada para este estudio, se ha decidido descartar los procesos de conversión basados en las iso-parafinas sintéticas (*SIP*), esto debido al bajo porcentaje de mezcla permitido relativo a otras tecnologías disponibles, además de que su baja madurez tecnológica provoca que no sea económicamente viable [48], lo cual se debe sumar al hecho de que no se identificaron fuentes relevantes de materias primas para este proceso en Chile.

A continuación se muestran los procesos de conversión estudiados:

- *HEFA*.
- *FT*.
- *AtJ*.
- *CHJ*.
- *PtL*.
- Pirólisis.

Al adaptar parte del trabajo presentado por Okolie et al. (2023), en particular el análisis comparativo de tecnologías y la comparación en términos de eficiencia energética, se tienen los resultados mostrados en las tablas 4.5 y 4.6.

Tabla 4.5: Rendimiento promedio para los procesos de conversión estudiados, a partir de la información obtenida en [16, 49–52].

| | AtJ | FT | HEFA | CHJ | PtL | Pirólisis |
|-------------|------|------|------|------|------|-----------|
| Rendimiento | 56 % | 22 % | 83 % | 61 % | 42 % | 49 % |

En la tabla 4.5 se muestran rendimientos promedios asociados a la producción de combustible para las distintas tecnologías, este resultado es expresado de manera general como la proporción entre las toneladas de combustible obtenido y las toneladas de materia prima usadas, a excepción del proceso *PtL*, el cual expresa el rendimiento como la proporción entre los MW de combustible obtenido y los MW de electricidad requeridos durante el proceso. Mientras que en la tabla 4.6 se presentan las ventajas y limitaciones de los procesos de conversión estudiados.

Tabla 4.6: Tabla comparativa de las diversas tecnologías consideradas en este estudio, basada en Okolie et al. (2023) [53].

| Proceso de conversión | Ventajas | Limitaciones |
|----------------------------------|---|--|
| Tecnologías HEFA | <ol style="list-style-type: none"> 1. Debido a la naturaleza exotérmica de las reacciones presentes durante los procesos HEFA, se tiene un bajo costo energético en producciones de gran escala, permitiendo que esta tecnología sea económicamente viable sin generar un impacto ambiental desproporcionado. 2. El SAF producido mediante este proceso ha demostrado poseer características que mejoran el rendimiento de los combustibles de aviación convencionales [26, 53]. 3. Se ha identificado que la calidad del combustible producido mediante este proceso no depende del tipo o calidad de la materia prima utilizada, permitiendo flexibilidad en el suministro de materias primas. 4. Ciertos porcentajes de mezcla de Jet Fuel A-1 y SAF, producido vía HEFA, presentan una emisión menor de material particulado durante las operaciones en tierra y el despegue [26, 53]. 5. Esta tecnología presenta un alto grado de madurez tecnológico y comercial. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Gran parte de la disponibilidad de materias primas es limitada relativo a la demanda esperada por la industria. 2. La producción de bio diesel (HVO), resulta mucho más competitiva tanto en rendimiento como en costos, comparada con la producción de SAF[53]. 3. Durante el proceso de conversión, se requiere de una alta cantidad de hidrógeno, la cual no puede ser suplida por medios tradicionales, necesitando encontrar fuentes alternativas para mantener el proceso económicamente viable [53]. |
| Tecnologías FT | <ol style="list-style-type: none"> 1. Las tecnologías basadas en un proceso FT presentan un mayor rango de opciones de materias primas en comparación con otras tecnologías. 2. Los procesos basados en tecnologías FT presentan una alta eficiencia energética a la hora de convertir las materias primas en SAF [53]. 3. Debido a que, el SAF producido por procesos FT presenta una cantidad de estructuras aromáticas dentro de los rangos permitidos por normas internacionales, sería posible hacer uso de estos SAF sin necesidad de mezclarlo con combustibles convencionales. 4. Debido a que, el SAF producido por procesos FT se puede considerar libre de sulfuros, no existen emisiones de SOx durante la combustión. 5. Esta tecnología presenta un alto grado de madurez comercial, permitiendo que sea altamente rentable. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Existe una desproporción entre los avances presentados para tecnologías FT en base a carbón o gas natural, con respecto a los avances realizados para materias primas basadas en desechos. 2. Ciertas tecnologías como Gas-to-Liquid, resultan demasiado costosas para ser comercialmente viables. 3. La implementación de producción mediante gasificación FT a gran escala, para ciertas materias primas, es poco probable en un futuro cercano [53]. |
| Tecnologías AtJ | <ol style="list-style-type: none"> 1. La calidad del SAF producido mediante este proceso, presenta una cantidad de estructuras aromáticas dentro de los rangos aceptados por normativas internacional, permitiendo su potencial uso como combustible primario [53]. 2. Este proceso puede aprovechar diversos tipos de desechos, permitiendo flexibilidad a la hora de elegir la fuente primaria de materia prima. 3. Nuevos avances tecnológicos presentan el potencial de aumentar la competitividad de este proceso. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Al considerar AtJ a partir de fuentes como bioethanol, se tiene un bajo rendimiento. 2. La cadena de producción de este proceso es una de las más largas, resultando en ciclos de producción más largos y requiriendo mayor uso de recursos como agua y suelos. 3. Los altos costos de producción limitan la competitividad comercial de los SAF producidos mediante este proceso. 4. Existe una baja cantidad de publicaciones en torno a la investigación y desarrollo de esta tecnología. |
| Tecnologías CHJ | <ol style="list-style-type: none"> 1. Este proceso de conversión presenta una gran cantidad de opciones en cuanto a tipos de materias primas basadas en lípidos, sin perjudicar el rendimiento [51]. 2. El SAF producido mediante este proceso, presenta una alta densidad de estructuras aromáticas y ciclo parafinas, así como una alta densidad de combustible y contenido energético volumétrico, comparable a los combustibles derivados del petróleo [51]. 3. Las propiedades del SAF producido a partir de aceites de soya, jatrofa, camelina, carinata y tung, son comparables a las presentadas por los combustibles de aviación convencionales (Jet A) [51]. | <ol style="list-style-type: none"> 1. El SAF producido mediante este proceso presenta un valor poco competitivo en el mercado, por lo que requeriría de incentivos externos. 2. Las materias primas usadas durante este proceso requieren de una etapa de pretratamiento para asegurar la calidad del combustible. 3. Para obtener SAF de calidad a partir de este proceso aún se requiere una etapa de refinamiento [51]. |
| Tecnologías PtL | <ol style="list-style-type: none"> 1. Actualmente hace uso de un proceso FT durante la conversión, el cual se encuentra aprobado para su uso comercial, y cuenta con un desarrollo futuro enfocado en hacer uso de procesos como Methanol-to-Jet, que podría resultar económicamente más competitivo [27, 54]. 2. Durante la producción de SAF mediante este proceso se tiene una reducción de casi el 100% de la huella de CO₂. 3. Debido a que la principal materia prima de este proceso corresponde a energía eléctrica y captura de CO₂, se presenta como el proceso con mejor potencial a la hora de cubrir la demanda futura de SAF sin entrar en perjuicio de sus beneficios ambientales [17]. 4. Este proceso presenta una de las menores demandas en términos de uso de suelo y agua dentro de las tecnologías estudiadas [17]. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Actualmente, este proceso resulta en un SAF de mayor costo comparado con otras tecnologías, lo cual viene asociado a los altos costos de producción de H₂ y procesos de captura de CO₂[17, 54]. 2. Es un proceso altamente dependiente de la disponibilidad de recursos de ERNC. 3. El uso de electricidad durante este proceso podría infringir alguno de los criterios de sostenibilidad impuestos por la OACI [17]. |
| Tecnologías basadas en Pirólisis | <ol style="list-style-type: none"> 1. A baja escala, estas tecnologías requieren de un bajo costo capital y presentan un buen factor de eficiencia energética al ser usada dentro de otros procesos. 2. Puede usar materias primas residuales, como plásticos y neumáticos fuera de uso. | <ol style="list-style-type: none"> 1. No cuenta con aprobación actual por parte de normas ASTM. 2. El SAF producido por este proceso es un combustible de baja calidad. 3. La producción a gran escala no es económicamente viable dentro de un futuro próximo. 4. Requiere un mayor grado de avance tecnológico. |

Para poder establecer cual de las tecnologías estudiadas presenta el mayor potencial intrínseco para la producción de *SAF* en Chile se confecciona una matriz de decisión a partir de los siguientes parámetros:

- Aprobación ASTM: Este parámetro busca otorgar un peso jerárquico basado si el proceso en cuestión se encuentra aprobado, en vías de aprobación o no aprobado, dentro de las normas *ASTM*.
- Porcentaje de mezcla: Este parámetro pondera el porcentaje de mezcla máximo permitido de *SAF* con combustibles convencionales para los distintos procesos estudiados, otorgándole una ponderación mayor a los procesos que eventualmente pudieran ser usado como combustible primario.
- Flexibilidad de materias primas: Este parámetro busca favorecer con una mejor ponderación, a los procesos que cuenten con una mayor cantidad de materias primas disponibles, dando un beneficio adicional si la materia prima proviene de desechos o material reciclado.

- Potencial de uso: Mediante este parámetro se toma en consideración el potencial de cada uno de los procesos de ser usados de manera viable dentro del corto, mediano o largo plazo.

La evaluación en torno al parámetro de aprobación *ASTM* viene dada según, si la tecnología no se encuentra en proceso de tramitación para su aprobación, recibiendo una calificación de uno (1), el siguiente nivel corresponde al caso en que la tecnología no se encuentre actualmente aprobada, pero si exista un proceso de tramitación, recibiendo una calificación de dos (2), y finalmente se tiene que el proceso cuente con aprobación vigente, recibiendo una calificación máxima de tres (3).

De manera similar se tiene que para el porcentaje de mezcla se le asigna una calificación de 1 (1) si el combustible no puede ser mezclado, como es el caso del combustible que no cuente con aprobación *ASTM*, mientras que se le asigna una calificación de dos (2) a las tecnologías que presenten un límite de mezcla del 10 %, para las tecnologías que permitan producir un *SAF* con un porcentaje de mezcla de un 30 % se tiene una calificación de tres (3), mientras que se le otorga una calificación de cuatro (4) a los procesos que permiten un 50 % de mezcla según normativas *ASTM*, finalmente se tiene con una calificación de cinco (5) a las tecnologías que presentan potencial respecto al uso del combustible producido sin necesidad de mezclarlo con combustible convencional.

A su vez, el parámetro asociado a la flexibilidad de materias primas se califica según si para la tecnología estudiada solo es posible usar un tipo de materia prima posterior a una etapa de pre-tratamiento, recibiendo una calificación de uno (1), mientras que si la tecnología estudiada permite hacer uso de una materia prima sin una etapa de pre-tratamiento previo, se le asigna una calificación de dos (2), finalmente se tienen las tecnologías que permiten hacer uso de varias materias primas y desechos sin necesidad de un uso extensivo de etapas de pre-tratamiento, recibiendo una calificación de tres (3).

El parámetro asociado al potencial de uso de cada tecnología se califica según, si la tecnología presenta un potencial de uso viable en el largo plazo, recibiendo una calificación de uno (1), si la tecnología presenta potencial de ser viable en el mediano plazo, recibiendo una calificación de 2 (2), y finalmente, si la tecnología presenta potencial de ser usada de manera viable en el corto plazo, recibiendo una calificación de tres (3).

Al considerar los parámetros antes mencionados se tiene como resultado la matriz mostrada en la tabla 4.7, donde se tiene que los procesos *HEFA* y *FT* son los que presentan mejor ponderación a la hora de estimar su potencial para la producción de *SAF*, quedando igualados con 35pts, seguidos de los procesos *AtJ* y *PtL*, en tercer y cuarto lugar respectivamente. Cabe mencionar que los procesos basados en pirólisis presentan la peor ponderación de las tecnologías estudiadas, esto debido a que al día de hoy se encuentra en proceso de aprobación *ASTM*, por lo que no cuenta con un porcentaje de mezcla que pudiera ser usado para compararse con los otros procesos.

Tabla 4.7: Matriz de decisión resultante para las distintos procesos estudiados.

| | Aprobación ASTM (peso = 4) | Porcentaje de mezcla (peso = 2) | Flexibilidad de materias primas (peso = 2) | Potencial de uso (peso = 3) | Total |
|-----------|-------------------------------|------------------------------------|---|--------------------------------|-------|
| HEFA | 3 | 4 | 3 | 3 | 35 |
| FT | 3 | 5 | 2 | 3 | 35 |
| AtJ | 3 | 5 | 2 | 2 | 32 |
| CHJ | 3 | 4 | 1 | 2 | 28 |
| PtL | 3 | 4 | 1 | 3 | 31 |
| Pirólisis | 2 | 1 | 2 | 1 | 17 |

4.4. Propuesta enfocada en Chile

Se debe destacar que, los resultados anteriormente mostrados para la clasificación de tecnologías no toman en cuenta los resultados obtenidos sobre la disponibilidad de materias primas presentes en el territorio nacional, más allá de servir de guía para definir cuales tecnologías serían las estudiadas a lo largo de este trabajo.

Por lo anterior, se ha decidido expandir sobre los resultados anteriores con el fin de poder proponer las diversas tecnologías que presentan un potencial real en Chile. Para esto se presenta en la tabla 4.8 una matriz de decisión para las diversas materias primas, considerando localización y disponibilidad en el territorio nacional y, a su vez, políticas públicas que pudieran afectar en el desarrollo tecnológico, o comercial, de estas materias primas.

Tabla 4.8: Matriz de decisión resultante para las materias primas identificadas.

| | Disponibilidad (peso = 3) | Localización (peso = 1) | Políticas públicas (peso = 2) | Total |
|------------------------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------------|-------|
| Aceites de cocina usados | 4 | 4 | 3 | 22 |
| Neumáticos fuera de uso | 3 | 5 | 3 | 20 |
| Desechos sólidos municipales | 2 | 4 | 1 | 12 |
| Cultivos altos en aceites | 3 | 3 | 2 | 16 |
| Biomasa forestal | 1 | 1 | 2 | 8 |
| Hidrógeno verde | 5 | 3 | 3 | 24 |

Los parámetros mostrados en la tabla anterior se definen a continuación:

- Disponibilidad: Evalúa el grado de disponibilidad de cada materia prima, ponderando con una baja calificación si la materia prima presenta limitaciones de disponibilidad asociadas a posibles conflictos de sostenibilidad, y con una calificación más alta si no presenta conflictos aparentes.
- Localización: Este parámetro busca favorecer con una mejor ponderación, a las materias primas según la cantidad de zonas en las que se encuentren presentes.
- Políticas públicas: Mediante este parámetro se toma en consideración la cantidad de políticas públicas que afectan el desarrollo de cada materia prima.

Para poder evaluar la disponibilidad de cada materia prima se le asigna una calificación dependiendo de si existe, o no, una limitación para su disponibilidad según, si la materia prima presenta

posibles limitaciones en torno a los criterios de sostenibilidad definidos, recibiendo una calificación de uno (1), si la materia prima presenta limitaciones respecto a su desarrollo tecnológico, recibiendo una calificación de dos (2), si la materia prima presenta limitaciones en torno al desarrollo industrial necesario para mantener su disponibilidad, recibiendo una calificación de tres (3), si la materia prima presenta limitaciones comerciales, como precios más atractivos fuera de Chile o competencias con industrias ya establecidas, recibiendo una calificación de cuatro (4), y finalmente, si la materia prima no presenta limitaciones aparentes se le asigna una calificación de cinco (5).

En cuanto a la localización de estas materias primas, se evalúa con una calificación de uno (1) si la materia prima solo se encuentra en una de las macro zonas propuestas para Chile, mientras que si la materia prima se encuentra presente en dos de las macro zonas propuestas se le asigna una calificación de dos (2), lo mismo ocurre para las materias primas presentes en tres, cuatro o cinco de las macro zonas, recibiendo una calificación de tres (3), cuatro (4) y cinco (5), respectivamente.

El parámetro asociado a las políticas públicas se evalúa según, si no se han identificado políticas a nivel nacional o regional, recibiendo una calificación de uno (1), si se identificaron únicamente políticas a nivel regional, recibiendo una calificación de dos (2), y finalmente, si la materia prima cuenta con políticas a nivel nacional se le asigna una calificación de tres (3).

De la tabla 4.8, es posible apreciar que el hidrógeno resulta como una de las materias primas más atractivas en Chile, considerando el amplio impacto que tiene la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde en su desarrollo. Luego aparecen los aceites de cocina usados y los *NFU*, en segundo y tercer lugar respectivamente, los cuales se benefician de políticas públicas como la Ley REP.

En último lugar, en cuanto a atractivo potencial para Chile, aparece la biomasa forestal, que se ve altamente limitada por su ubicación geográfica, considerando que gran parte del bosque nativo que pudiera ser explotado se encuentra en la región de Aysén y presenta altas dificultades logísticas para su uso [38]. Adicionalmente la disponibilidad de esta materia prima se ve limitada, no solo por temas logísticos, si no que por una amplia desaprobación social en torno a la explotación del bosque nativo, mientras que al considerar desechos de aserrío se entra en competición con mercados regionales [38], dificultando su explotación en base a posibles conflictos con los criterios de sostenibilidad.

En paralelo, a partir de información pública entregada por la Junta Aeronáutica Civil (JAC), se tiene un crecimiento estimado en cuanto a emisiones generadas y consumos de combustible para la industria nacional según se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4.9: Estimación de emisiones y consumo de combustible para Chile [55].

| | Emisiones de CO2 (toneladas) | Consumo de combustible en kg (1 kg de Jet Fuel = 3,16 kg de CO2) | Consumo de combustible en MM de litros (densidad Jet Fuel = 0,8 kg por litro) |
|------|---------------------------------|---|--|
| 2025 | 8.346.809 | 2.641.395,253 | 2641,4 |
| 2030 | 10.156.931 | 3.214.218,671 | 3214,2 |
| 2035 | 12.156.582 | 3.847.019,620 | 3847,0 |
| 2040 | 14.370.230 | 4.547.541,139 | 4547,5 |

Lo cual sumado a la metas de utilización de *SAF* establecidas por la Unión Europea, en políticas

como *Fit for 55* y *ReFuelEU Aviation* [56, 57], permite estimar los requerimientos de *SAF* a nivel país, como se muestra en la tabla 4.10.

Tabla 4.10: Consumo estimado de combustible para el mercado domestico e internacional en Chile, 2025-2040.

| | Metas de uso de SAF (EU) | Consumo total de combustible en Chile (MM de litros) | Consumo de SAF estimado (MM de litros) |
|------|-----------------------------|---|---|
| 2025 | 2 % | 2.641,40 | 53 |
| 2030 | 10 % | 3.214,22 | 321 |
| 2035 | 25 % | 3.847,02 | 962 |
| 2040 | 50 % | 4.547,54 | 2.274 |

Adicionalmente es posible utilizar los rendimientos promedios asociados a la producción de combustible para las distintas tecnologías, según lo expuesto en la tabla 4.5 , para calcular cuanto combustible es posible producir a partir de las diversas materias primas identificadas. Tal como se muestra a continuación.

Tabla 4.11: Producción de *SAF* estimada para las distintas materias primas.

| Materia prima | Proceso de conversión | Rendimiento | Disponibilidad actual | Producción de SAF (MM de litros) |
|------------------------------|-----------------------|-------------|-----------------------|-------------------------------------|
| Aceites de cocina usado | HEFA | 83 % | 8.400 ton/año | 8,72 |
| NFU | Pirólisis | 49 % | 140.000 ton/año | 85,75 |
| Desechos sólidos municipales | FT | 22 % | 81.774 ton/año | 0,02 |
| Cultivos altos en aceite | CHJ | 61 % | 146 Ha | 0,00 |
| Biomasa forestal | FT | 22 % | 968.137 ton/año | 266,24 |
| | AtJ | 56 % | 267.300 ton/año | 187,11 |
| Hidrógeno verde | PtL | 49 % | 4328,1 MW | 719,87 |

A partir de los resultados obtenidos en la tabla 4.11, se puede apreciar que la producción de *SAF* a partir de hidrógeno, considerando únicamente la capacidad eólica instalada al año 2022 [58], es capaz de satisfacer la demanda esperada de *SAF* en Chile hasta el año 2030. Adicionalmente se tiene que la biomasa foresta, como bosque nativo en el caso de tecnologías *FT* y como desechos de aserrío en el caso de *AtJ*, y los *NFU* tienen el potencial de satisfacer a Chile con sus requerimientos de *SAF* hasta el año 2025, en el caso de poder hacer uso de estos recursos. Cabe destacar que, si bien, los aceites de cocina usados presentaban un gran potencial para ser usados en Chile, su mayor limitante resulta en la disponibilidad actual del insumo, ya que las 8.400 toneladas al año no permiten satisfacer la potencial demanda de *SAF* en Chile.

Finalmente, a partir de los datos mostrados en esta sección, se propone que las tecnologías con mayor relevancia para la producción de *SAF* en Chile son las tecnologías *PtL*, *FT*, *AtJ* y tecnologías basadas en procesos de pirólisis, donde estas últimas tecnologías se encuentran condicionadas a posibles avances en su proceso de aprobación por normativas *ASTM*.

5. Conclusiones y discusión

Se logra el objetivo general del trabajo, proponiendo las materias primas y tecnologías que mejor se pueden adaptar a una eventual producción de *SAF* en Chile. Estas materias primas son evaluadas según su disponibilidad, localización y cantidad de políticas públicas que pueden afectar su desarrollo, permitiendo identificar que el hidrógeno verde, los *NFU* y los aceites de cocina usados presentan el mayor potencial para su uso, esto asociado a las diversas políticas públicas que incentivan el desarrollo de sus respectivos mercados en Chile. Mientras que se identifican que las tecnologías con mayor potencial, en cuanto a su madurez y flexibilidad de uso de diversas materias primas, corresponden a las tecnologías *HEFA* y *FT*, sin dejar de considerar tecnologías como *AtJ* y *PtL*, que presentan un potencial similar a las dos primas tecnologías mencionadas.

Si se consideran las cuotas de *SAF* que requeriría el mercado nacional, y como las diversas combinaciones de tecnologías y materias primas permiten satisfacer estas demandas, se tiene que las tecnologías *PtL*, *FT*, *AtJ* y pirólisis son las únicas que presentan un real potencial al día de hoy a la hora de satisfacer las necesidades del mercado local. Por lo que se recomienda estudiar de cerca si las limitaciones de obtención de materias primas, como la biomasa forestal, o las limitaciones tecnológicas, como la falta de aprobación para los procesos basados en pirólisis, presentan dificultades como las asumidas en este estudio. Cabe mencionar que, ante la posibilidad de hacer uso de tecnologías *PtL*, aparecen ventajas adicionales como la eventual preparación de la matriz energética de Chile para poder comenzar una transición de combustibles basados en hidrocarburos a combustibles basados en hidrógeno, esto apoyado mediante políticas públicas.

Se debe considerar que puede existir una discrepancia en cuanto a la estimación de los recursos disponibles y la disponibilidad efectiva de estos, debido a que en el presente estudio no se consideran factores como el uso competitivo de algunas de estas materias primas para su uso en otras fuentes de energía, la falta de planificación en cuanto al manejo de desechos a nivel nacional, la imposibilidad de hacer uso de ciertas materias primas por normativa y el efecto que pudiera tener la competitividad en el precio de estas materias.

Cabe mencionar que, el presente estudio toma en cuenta escenarios ideales de disponibilidad de materia prima y capacidades de producción de *SAF*, permitiendo suponer que los potenciales de disponibilidad de materias primas se ven limitados únicamente por su disponibilidad teórica actual, afectando esto a su capacidad de producción. Adicionalmente se tiene que en el presente estudio no consideran en profundidad ciertos costos económicos como el CAPEX, OPEX, costos de producción y costos del *SAF* relativo a los combustibles tradicionales. Por lo que se recomienda que futuros estudios de este tipo puedan tomar en cuenta estas limitaciones, y considerarlas a la hora de realizar

un análisis de preferencia en torno a la factibilidad tecno-económica para las tecnologías y materias primas estudiadas.

Se recomienda para futuros estudios, reducir el universo de investigación, enfocando el estudio en una única materia prima o tecnología, permitiendo así poder explorar en mayor profundidad los impactos sociales y económicos que pudieran afectar la recomendación de una opción por sobre la otra.

Bibliografía

- [1] OACI, “International civil aviation organization, innovations for reduction of aviation co2 emissions,” [Accessed November 2022], <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/SAF.aspx>.
- [2] ASTM, “Testing and Materials. Standard Specification for Aviation Turbine Fuels. ASTM.” 1993.
- [3] OACI, “Carbon offsetting and reduction scheme for international aviation (CORSIA),” annex 16, vol. IV, 2018.
- [4] ASE, “Combustibles de aviación sostenibles saf,” Agencia de Sostenibilidad Energética, programa Vuelo Limpio, 2022, <https://vuelolimpio.cl/wp-content/uploads/2022/10/Combustibles-de-Aviacion-Sostenibles-SAF-Vuelo-Limpio-1.pdf>.
- [5] Quante, G., Bullerdiek, N., Bube, S., Neuling, U., y Kaltschmitt, M., “Renewable fuel options for aviation – a system-wide comparison of drop-in and non drop-in fuel options,” *Fuel*, vol. 333, p. 126269, 2023, doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126269>.
- [6] OACI, “Internation civil aviation organization, sustainable aviation fuels (saf),” [Accessed November 2022], <https://www.icao.int/environmental-protection/pages/SAF.aspx>.
- [7] Lee, D., Fahey, D., Skowron, A., Allen, M., Burkhardt, U., Chen, Q., Doherty, S., Freeman, S., Forster, P., Fuglestvedt, J., Gettelman, A., De León, R., Lim, L., Lund, M., Millar, R., Owen, B., Penner, J., Pitari, G., Prather, M., Sausen, R., y Wilcox, L., “The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018,” *Atmospheric Environment*, vol. 244, p. 117834, 2021, doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>.
- [8] Standard, D., “Turbine fuel, aviation kerosine type, jet a-1 nato code: F-35, joint service designation: Avtur,” *Ministry of Defence*, vol. 30, 2008.
- [9] ASTM, “ASTM, A. D7566-16b: Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons. Book of Standards, 5.ASTM A. Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons.” 2016.
- [10] Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción, Gobierno de Chile, “Decreto 160: Aprueba reglamento de seguridad para las instalaciones y operaciones de producción y refinación, transporte, almacenamiento, distribución y abastecimiento de combustibles líquidos.”, <https://bcn.cl/2kfdq>.
- [11] OACI, “International civil aviation organization, conversion processes,” [Accessed November 2022], <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Conversion-processes.aspx>.

- [12] OACI, “CORSA Eligible Fuels – Life Cycle Assessment Methodology,” 2022, doi:https://www.icao.int/environmental-protection/CORSA/Documents/CORSA_Eligible_Fuels/CORSA_Supporting_Document_CORSA%20Eligible%20Fuels_LCA_Methodology_V5.pdf.
- [13] OACI, “Sustainable Aviation Fuels Guide,” 2018, https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/Sustainable%20Aviation%20Fuels%20Guide_100519.pdf.
- [14] Yang, H. y O’Connell, J. F., “Short-term carbon emissions forecast for aviation industry in shanghai,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 275, p. 122734, 2020, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122734>.
- [15] OACI, “International Civil Aviation Organization, Sustainability Criteria,” 2021, <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSA/Documents/ICAO%20document%2005%20-%20Sustainability%20Criteria%20-%20November%202021.pdf>.
- [16] Batteiger, V., Schmidt, P., Weindorf, W., Ebner, K., Habersetzer, A., Moser, L., y Raksha, T., “Power-to-liquids - a scalable and sustainable fuel supply perspective for aviation,” 2022.
- [17] Schmidt, P., Batteiger, V., Roth, A., Weindorf, W., y Raksha, T., “Power-to-liquids as renewable fuel option for aviation: A review,” *Chemie Ingenieur Technik*, vol. 90, no. 1-2, pp. 127–140, 2018, doi:<https://doi.org/10.1002/cite.201700129>.
- [18] ATAG, “Beginner’s guide to sustainable aviation fuel,” Air Transport Action Group, 2017.
- [19] Ministerio de Energía, Gobierno de Chile, “Estrategia Nacional de Electro Movilidad,” 2021, https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/estrategia_nacional_de_electromovilidad_2021_0.pdf.
- [20] Ministerio de Energía, Gobierno de Chile, “Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde,” 2020, https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf.
- [21] Hoekstra, A., “The underestimated potential of battery electric vehicles to reduce emissions,” *Joule*, vol. 3, no. 6, pp. 1412–1414, 2019, doi:<https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.06.002>.
- [22] Petrescu, R. V. V., Machín, A., Fontánez, K., Arango, J. C., Márquez, F. M., y Petrescu, F. I. T., “Hydrogen for aircraft power and propulsion,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 41, pp. 20740–20764, 2020, doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.253>.
- [23] “Mesa de trabajo público privada: Desafíos para una estrategia nacional de combustibles de aviación sostenibles. sesión de lanzamiento,” 2022, https://vuelolimpio.cl/wp-content/uploads/2022/11/Presentaciones-lanzamiento-Mesa-de-SAF_compressed-1.pdf.
- [24] Programa Vuelo Limpio, “Mesa de trabajo público-provada para el desarrollo de combustibles de aviación sostenibles (saf) en chile,” <https://vuelolimpio.cl/estrategias-y-tecnicas-para-la-gestion-energetica/#mesa>. [Accessed July 2023].
- [25] Tan, I. H. y Liou, W., Performance and Emission of a Biofueled Micro Turbojet Engine, doi:[10.2514/6.2013-110](https://doi.org/10.2514/6.2013-110).
- [26] Kroyan, Y., Wojcieszek, M., Kaario, O., y Larmi, M., “Modeling the impact of sustainable aviation fuel properties on end-use performance and emissions in aircraft jet engines,” *Energy*, vol. 255, p. 124470, 2022, doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124470>.
- [27] “Mesa de trabajo público privada: Desafíos para una estrategia nacional de combustibles de aviación sostenibles. acta segunda sesión de lanzamiento,” 2022, <https://vuelolimpio.cl/wp-con>

- tent/uploads/2023/03/Acta-Segunda-Mesa_Entrega_Revisionfinal.pdf.
- [28] “Mesa de trabajo público privada: Desafíos para una estrategia nacional de combustibles de aviación sostenibles, segunda sesión,” 2022, <https://vuelolimpio.cl/wp-content/uploads/2022/12/Presentaciones-segunda-mesa.pdf>.
- [29] “Mesa de trabajo público privada: Desafíos para una estrategia nacional de combustibles de aviación sostenibles. acta tercera sesión de lanzamiento,” 2023, https://vuelolimpio.cl/wp-content/uploads/2023/04/Acta-Tercera-Mesa_HDR_Final.pdf.
- [30] “Mesa de trabajo público privada: Desafíos para una estrategia nacional de combustibles de aviación sostenibles, tercera sesión,” 2023, <https://vuelolimpio.cl/wp-content/uploads/2023/01/Presentaciones-3ra-mesa.pdf>.
- [31] “Mesa de trabajo público privada: Desafíos para una estrategia nacional de combustibles de aviación sostenibles. acta cuarta sesión de lanzamiento,” 2023, <https://vuelolimpio.cl/wp-content/uploads/2023/05/Acta-Cuarta-Mesa-SAF.pdf>.
- [32] “Mesa de trabajo público privada: Desafíos para una estrategia nacional de combustibles de aviación sostenibles, cuarta sesión,” 2023, <https://vuelolimpio.cl/wp-content/uploads/2023/04/Presentacion-final-cuarta-mesa-SAF.pdf>.
- [33] Zhang, L., Butler, T. L., y Yang*, B., Recent Trends, Opportunities and Challenges of Sustainable Aviation Fuel, cap. 5, pp. 85–110. John Wiley Sons, Ltd, 2020, doi:<https://doi.org/10.1002/9781119152057.ch5>.
- [34] CONAF, “Explorador de biomasa.”, <https://sit.conaf.cl/>.
- [35] Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile, “Ley 20920: Establece marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje.”, <https://bcn.cl/2f7b2>.
- [36] Odepa, “Series anuales por producto de exportación / importación.”, <https://reportes.odepa.gob.cl/#/series-anuales-producto-export-import>.
- [37] Ministerio del Medioambiente, Gobierno de Chile, Sexto Reporte del Estado del Medio Ambiente, cap. Capítulo 10. Sistema Nacional de Información Ambiental, 2021, <https://sinia.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2022/06/REMA2021.pdf>.
- [38] Cristina Segura, “Entrevista.” Transcripción disponible en Anexo B.
- [39] Ministerio del Medioambiente, Gobierno de Chile, Informe del estado del medio ambiente, cap. Capítulo 10. Sistema Nacional de Información Ambiental, 2020, <https://sinia.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/04/10-residuos.pdf>.
- [40] “Mesa de trabajo público privada: Desafíos para una estrategia nacional de combustibles de aviación sostenibles. acta sesión de lanzamiento,” 2022, https://vuelolimpio.cl/wp-content/uploads/2022/11/Acta-Lanzamiento-mesa-de-trabajo-SAF_compressed-1.pdf.
- [41] ATAG, “Waypoint 2050,” 2021, https://aviationbenefits.org/media/167417/w2050_v2021_27sept_full.pdf.
- [42] “Reunión sostenida entre Smarth Earth Camelina y la Agencia de Sostenibilidad Energética,” 2023.

- [43] “Reunión sostenida entre INIA y el programa Vuelo Limpio,” 2023.
- [44] Corporación Los Ríos, “Estudio de valorización energética de biomasa forestal en la región de los ríos,” en Valorización Energética de Biomasa Forestal, Universidad Austral de Chile, 2018.
- [45] Altamirano, A., Schlegel, B., Thiers, A., Miranda, A., Pilquinao, B., Orrego, R. A., y Rocha, C., “Disponibilidad y potencial energético de la biomasa del bosque nativo para el desarrollo de la dendroenergía en el centro-sur de Chile,” *Bosque (Valdivia)*, vol. 36, pp. 223 – 237, 2015, doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002015000200008>.
- [46] “Mesa de trabajo público privada: Desafíos para una estrategia nacional de combustibles de aviación sostenibles. quinta sesión,” 2023, <https://vuelolimpio.cl/wp-content/uploads/2023/06/5ta-mesa-SAF-Presentacion.pdf>.
- [47] OACI, “New sustainable aviation fuels (saf) technology pathways under development,” https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2022/ENVReport2022_Art49.pdf.
- [48] Doliente, S. S., Narayan, A., Tapia, J. F. D., Samsatli, N. J., Zhao, Y., y Samsatli, S., “Bio-aviation fuel: A comprehensive review and analysis of the supply chain components,” *Frontiers in Energy Research*, vol. 8, 2020, doi:[10.3389/fenrg.2020.00110](https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00110).
- [49] Shahriar, M. F. y Khanal, A., “The current techno-economic, environmental, policy status and perspectives of sustainable aviation fuel (saf),” *Fuel*, vol. 325, p. 124905, 2022, doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124905>.
- [50] Rahman, W.-U., Patel, M., Kurian, V., y Kumar, A., “A comparative techno-economic assessment of fast pyrolysis, hydrothermal liquefaction, and intermediate pyrolysis of municipal solid waste for liquid transportation fuels production,” *Energy Conversion and Management*, vol. 267, p. 115877, 2022, doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115877>.
- [51] Eswaran, S., Subramaniam, S., Geleynse, S., Brandt, K., Wolcott, M., y Zhang, X., “Techno-economic analysis of catalytic hydrothermolysis pathway for jet fuel production,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 151, p. 111516, 2021, doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111516>.
- [52] Sahir, A. H., Zhang, Y., Tan, E. C. D., y Tao, L., “Understanding the role of fischer–tropsch reaction kinetics in techno-economic analysis for co-conversion of natural gas and biomass to liquid transportation fuels,” *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 13, no. 5, pp. 1306–1320, 2019, doi:<https://doi.org/10.1002/bbb.2035>.
- [53] Okolie, J. A., Awotoye, D., Tabat, M. E., Okoye, P. U., Epelle, E. I., Ogbaga, C. C., Güleç, F., y Oboirien, B., “Multi-criteria decision analysis for the evaluation and screening of sustainable aviation fuel production pathways,” *iScience*, vol. 26, no. 6, p. 106944, 2023, doi:<https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106944>.
- [54] Cabrera, E. y Melo de Sousa, J., “Use of sustainable fuels in aviation—a review,” *Energies*, vol. 15, p. 2440, 2022, doi:[10.3390/en15072440](https://doi.org/10.3390/en15072440).
- [55] Junta Aeronáutica Civil, Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, Gobierno de Chile, “Plan estratégico del transporte aéreo,” <https://drive.google.com/file/d/1fSgAHINVM2QUWpxRZOHz0-8D77k7Plk-/view>.

- [56] European Parliamentary Research Service, “Fit for 55 package.”, [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/733513/EPRS_BRI\(2022\)733513_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/733513/EPRS_BRI(2022)733513_EN.pdf).
- [57] European Parliamentary Research Service, “Refueled aviation initiative.”, [https://www.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/729457/EPRS_BRI\(2022\)729457_EN.pdf](https://www.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/729457/EPRS_BRI(2022)729457_EN.pdf).
- [58] Coordinador Eléctrico Nacional, “Reportes y estadísticas año 2022.”, <https://www.coordinador.cl/reportes-y-estadisticas/>.

Anexos

Anexo A. Resultados

A.1. Residuos sólidos municipales

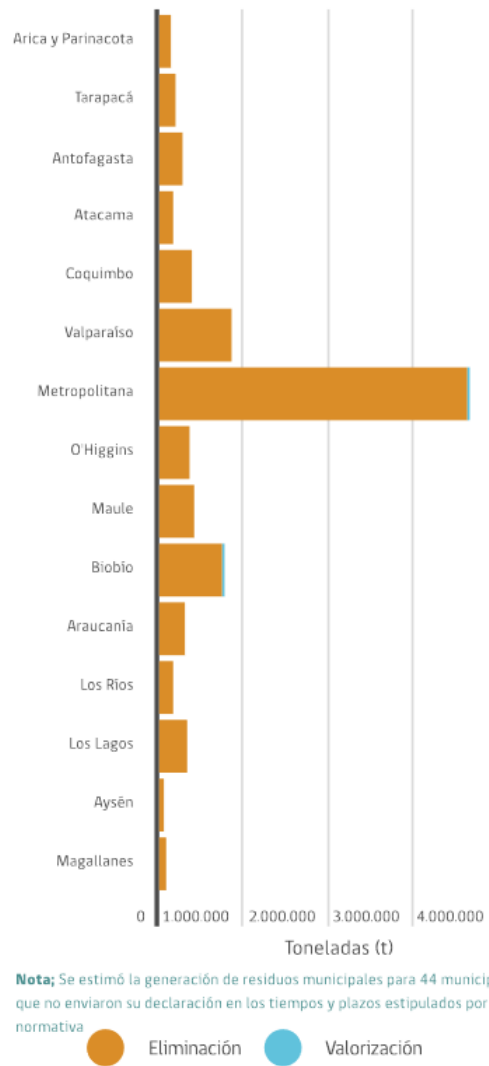


Figura A.1: Generación de Residuos Municipales a Nivel Regional estimado en base a lo reportado en SINADER, 2018.

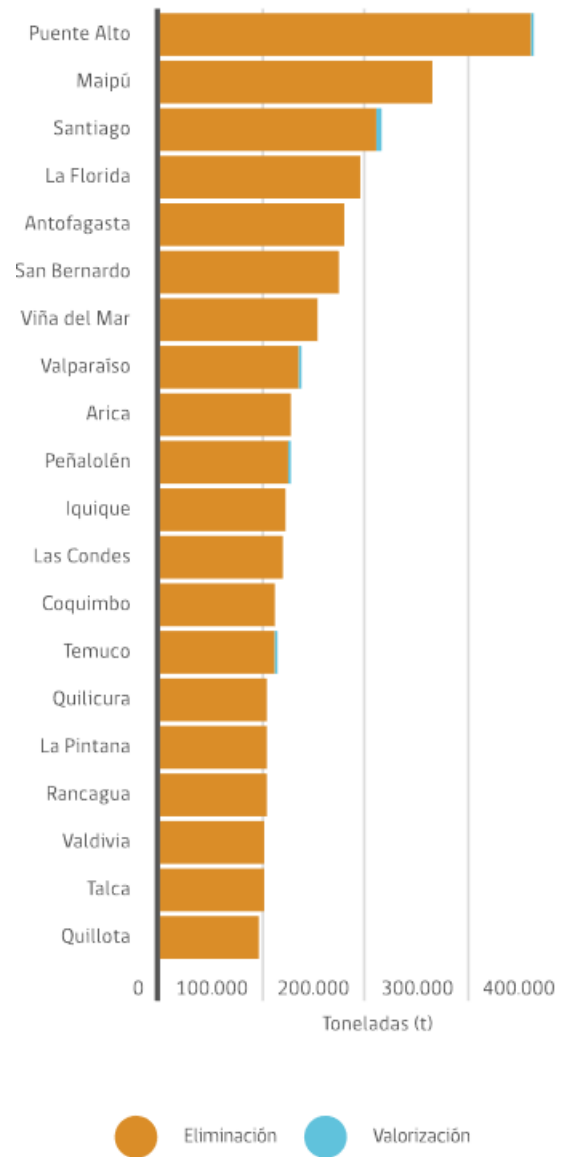


Figura A.2: Comunas con la mayor generación de Residuos Municipales, 2018.

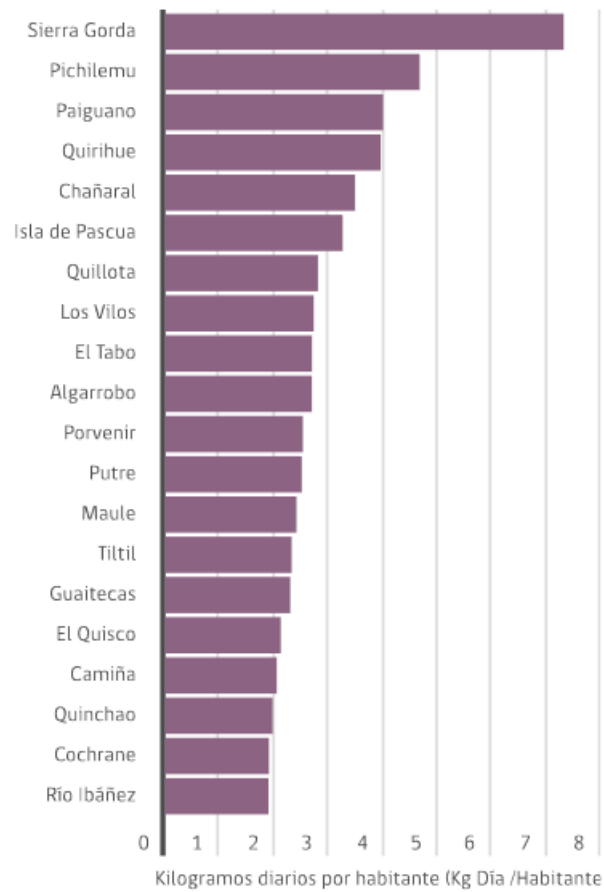


Figura A.3: Comunas con la mayor tasa Per Cápita de Residuos Municipales, 2018.

A.2. Biomasa Forestal

| Provincia | Tipo forestal | Subtipo forestal | Total (Mg ha ⁻¹) | Potencial disponible (Mg ha ⁻¹) ^a | Superficie total (ha) | Superficie neta (ha) ^b | Total potencial disponible final (Mg) ^c | |
|-------------------|--------------------|----------------------------|---------------------------------|--|--------------------------|--------------------------------------|--|------------|
| Malleco | roble-rauli-coigüe | renoval roble-rauli-coigüe | 340 | 31 | 65.392 | 48.553 | 1.484.960 | |
| | | renoval coigüe | 486 | 44 | 8.762 | 7.794 | 341.057 | |
| | | renoval roble | 250 | 23 | 78.771 | 66.707 | 1.503.026 | |
| | coigüe-rauli-tepa | coigüe-rauli-tepa | 307 | 37 | 15.508 | 6.248 | 229.934 | |
| | | bosque coigüe | 297 | 36 | 2.235 | 1.939 | 69.177 | |
| | | coigüe-tepa | 215 | 26 | 527 | 134 | 3.452 | |
| | siempreverde | siempreverde | 254 | 28 | 464 | 358 | 10.169 | |
| | | mirtáceas | 223 | 25 | 288 | 240 | 6.002 | |
| | Cautín | roble-rauli-coigüe | renoval roble-rauli-coigüe | 506 | 46 | 34.822 | 24.100 | 1.098.468 |
| | | | renoval coigüe | 387 | 35 | 70.654 | 43.563 | 1.516.620 |
| renoval roble | | | 243 | 22 | 138.989 | 116.005 | 2.536.642 | |
| coigüe-rauli-tepa | | coigüe-rauli-tepa | 423 | 51 | 9.180 | 7.040 | 357.378 | |
| | | bosque coigüe | 297 | 36 | 38.204 | 20.549 | 732.947 | |
| | | coigüe-tepa | 371 | 44 | 24.267 | 13.755 | 611.683 | |
| siempreverde | | siempreverde | 189 | 21 | 845 | 787 | 16.650 | |
| | | mirtáceas | 409 | 46 | 21.843 | 20.825 | 953.635 | |
| | | | bosque coigüe | 223 | 25 | 6.846 | 5.925 | 147.914 |
| Valdivia | | roble-rauli-coigüe | renoval roble-rauli-coigüe | 308 | 32 | 4.235 | 442 | 14.312 |
| | renoval coigüe | | 394 | 41 | 22.943 | 12.489 | 516.129 | |
| | renoval roble | | 312 | 33 | 57.165 | 39.088 | 1.281.737 | |
| | coigüe-rauli-tepa | coigüe-rauli-tepa | 702 | 91 | 43.208 | 8.819 | 798.242 | |
| | | bosque coigüe | 667 | 86 | 42.248 | 15.800 | 1.358.780 | |
| | | coigüe-tepa | 673 | 87 | 21.312 | 9.936 | 862.787 | |
| | siempreverde | renoval canelo | 186 | 17 | 14.067 | 8.500 | 143.480 | |
| | | coigüe de Chiloé | 843 | 77 | 13.655 | 2.153 | 165.180 | |
| | | siempreverde | 495 | 45 | 65.068 | 40.357 | 1.816.378 | |
| | | mirtáceas | 264 | 24 | 5.016 | 1.495 | 35.870 | |
| Ranco | roble-rauli-coigüe | renoval roble-rauli-coigüe | 346 | 36 | 3.776 | 1.020 | 37.037 | |
| | | renoval coigüe | 487 | 51 | 19.920 | 14.298 | 731.357 | |
| | | renoval roble | 255 | 27 | 37.780 | 24.930 | 667.443 | |
| | coigüe-rauli-tepa | coigüe-rauli-tepa | 768 | 99 | 20.573 | 4.428 | 438.528 | |
| | | bosque coigüe | 519 | 67 | 32.854 | 17.322 | 1.159.843 | |
| | | coigüe-tepa | 650 | 84 | 65.567 | 34.853 | 2.923.470 | |
| | siempreverde | renoval canelo | 105 | 10 | 7.360 | 4.578 | 43.852 | |
| | | coigüe de Chiloé | 443 | 40 | 20.339 | 437 | 17.651 | |
| | | siempreverde | 564 | 51 | 51.633 | 19.834 | 1.018.708 | |
| | | mirtáceas | 223 | 20 | 3.275 | 2.729 | 55.351 | |
| Osorno | roble-rauli-coigüe | renoval coigüe | 358 | 39 | 24.554 | 16.287 | 630.581 | |
| | | renoval roble | 280 | 30 | 27.053 | 23.468 | 708.775 | |
| | coigüe-rauli-tepa | coigüe-rauli-tepa | 307 | 31 | 20 | 0 | 0 | |
| | | bosque coigüe | 705 | 72 | 32.826 | 12.107 | 870.245 | |
| | | coigüe-tepa | 664 | 68 | 23.020 | 6.061 | 410.740 | |
| | siempreverde | renoval canelo | 272 | 34 | 11.494 | 5.641 | 193.488 | |
| | | coigüe de Chiloé | 651 | 82 | 55.093 | 7.492 | 614.518 | |
| | | siempreverde | 472 | 59 | 83.930 | 33.432 | 1.988.184 | |
| | | mirtáceas | 223 | 28 | 2.878 | 1.915 | 53.767 | |
| | Total | | | | | 1.330.460 | 754.435 | 31.176.148 |

Figura A.4: Biomasa total y potencial disponible en función de proporción de extracción, aprovechamiento y restricciones ambientales y legales por provincia, tipo y subtipo forestal (Altamirano et al, 2015).

Anexo B. Entrevista

B.1. Transcripción entrevista Dra. Cristina Segura, UdeC.

Entrevistada: Dra. Cristina Segura (C)

Fecha: 24 de Julio 2023

Entrevistador: Fabián Olave (F)

F: Está grabando, entonces para comenzar la idea de la primera pregunta es para dejar claro sus conocimientos, en base a los que va a responder a las siguientes preguntas. Así que, si se puede presentar doctora.

C: Me presento entonces?

F: Por favor.

C: Bueno, mi nombre es Cristina Segura, soy investigadora de la unidad de desarrollo tecnológico de la Universidad de Concepción donde trabajo hace 14 años, especialmente en procesos termoquímicos y en el desarrollo de biocombustibles sólidos y líquidos. Mi trayectoria ha sido investigación aplicada, y dentro de las investigaciones que llevo a cabo una de ellas ha sido producir combustibles tipo diesel, y también jet fuel, a partir de fuentes renovables.

F: Ya con el grueso de las preguntas, entendiendo que usted también tiene parte de su trabajo con la Asociación Chilena de Biomasa, y según lo que expuso en la Mesa SAF, quería preguntarle ¿cuáles son las principales materias primas que usted considera que se podrían considerar para la producción de SAF a nivel nacional?

C: Mira, para SAF es súper importante entender cuál es la materia prima, porque eso define de alguna manera la ruta de conversión. Y en Chile una de las mayores fuentes de biomasa o de recursos renovables que tenemos, son las plantaciones forestales por una parte y el bosque nativo. Como decía, las plantaciones forestales sostienen una industria súper desarrollada, que es la industria forestal, la de celulosa, madera y tableros. Por lo tanto no sé cuánto de eso puede quedar libre para otra aplicación, que no sea para el mercado para el que fueron establecidas.

Hay un potencial importante de diferentes estudios de establecer plantaciones específicas para fines energéticos, o lo que se le denomina dendroenergética, y eso hay hay varios estudios, y dentro de eso te puedo mandar luego los los datos más concretos y las hectáreas, que ellos han identificado como potenciales para desarrollar este tipo de plantaciones que son de corta rotación y con fines energéticos. Y luego está el bosque nativo, que el potencial es súper grande, bien importante, pero tiene varios desafíos. Uno es que se encuentra en el sur del país ,principalmente en la región de Aysén, ahí es donde se concentra el mayor volumen de estos bosques nativos. Segundo, la factibilidad para acceder a esa materia prima, por tema de caminos y de infraestructura. Y tercero, por temas con la comunidad, como lo ve la sociedad, en general, el uso de estos recursos para fines energéticos, aunque se ha hablado mucho y sé que hay algunas políticas públicas también, sobre todo en el ámbito dendroenergético de cómo hacer un aprovechamiento sostenible del bosque nativo, siempre hay una componente social y de la comunidad que se niega o se opone un poco a que se pueda acceder este tipo de recurso. Y la cuarta es del punto de vista económico, porque si bien su potencial es importante, poder extraer ese recurso de forma sustentable, porque no es tala rasa, sino que básicamente aquella

biomasa que ya está muerta o biomasa para hacer ciertos raleos, eso implica un costo que hoy día, desde mi punto de vista, no está bien estimado o no está completamente estimado, de cuánto cuesta sacar esa biomasa, y si no existe la infraestructura de caminos etcétera, todo eso encarece esos costos.

Por lo tanto, yo diría que en términos de biomasa lignocelulósica, el bosque nativo es una fuente renovable super importante y con un volumen considerable, pero creo que quedan interrogantes que resolver respecto al costo de obtener esa materia prima. Otro tipo de recursos, desde el punto de vista renovable y de biomasa en Chile, no tenemos mucho lo que son biomazas ricas en aceite, que es la materia prima más deseada para producir combustibles de aviación, yo diría que dentro de todas las fuentes de biomasa es la más apetecida, y Chile no tiene mucho espacio para producir ese tipo de biomasa porque compite por alimentación. Ya sea porque es el cultivo que produce aceite está destinado hoy día a la alimentación, o porque esa hectáreas, o ese suelo, va a competir con suelos para el cultivo de alimentos frente a un cultivo de energía. Entonces ahí yo no le veo tanto potencial de comenzar con ese tipo de biomasa. Ahora si vamos a la biomasa renovable del punto de vista industrial, pienso que la lignina es una fuente importante de biomasa, básicamente porque tenemos una industria de celulosa súper importante a nivel de global, con grandes producciones de celulosa, y de la fibra o de la madera el 30 % es lignina, y de esa lignina hoy día se quema en el licor negro de las plantas de celulosa.

Hoy día, ya hay empresas, bueno en Chile tenemos dos empresas, Arauco y CMPC, pero que ya están interesados en implementar proyectos de recuperación de esa lignina, que es lignina craft, y ese volumen es súper interesante. Aunque la tecnología para producir combustibles de aviación a partir de lignina todavía no está certificada, pero podría pensarse en mediano plazo, en que eso pudiera llegar a estar certificada como tal. Y para terminar, dentro de otros recursos que son importantes, del mundo agrícola así lo pensamos, la de cultivos anuales, como son las pajas de cereales es una biomasa que hoy día está disponible, y es un volumen considerable, de un millón de toneladas al año, un poco más, y que hoy en día gran parte de esa paja de cereales se queman rastrojos, lo que desde un punto de vista ambiental tiene un impacto súper considerable, desde los humos que genera hasta el CO₂ que está liberando al ambiente. Por lo tanto, yo creo que eso también es una biomasa lignocelulósica relevante en términos de volumen que se produce anualmente y que puede ser pensado para producir combustibles de aviación.

F: Perfecto. Muchas gracias. Ahora pasando a un tema que usted presentó en, si no me equivoco, en la tercera sesión, o cuarta sesión, de la mesa SAF. Preguntarle por este proyecto que usted hablaba de hacer uso de neumáticos fuera de uso, valga la redundancia, y plásticos residuales, eh, cómo usted ve el futuro de estas materias primas en cuanto al desarrollo tecnológico, y que se requiere. Y principalmente cuánto es el estimado de combustible que usted cree que se puede extraer considerando los datos que uno puede usar de la ley REP, por ejemplo 140.000 toneladas de neumáticos aproximadamente que se generan al año.

C: Sí, mira esos son, son fuentes de recursos que yo considero, el de neumático, en términos de volumen es súper considerable, el de plástico no tanto, pero sí podría llegar a serlo. La ventaja del plástico y del tipo de resinas que utilizamos, que principalmente son polietileno y polipropileno, su estructura química ya tiene la estructura química de los hidrocarburos y desde ese punto de vista transformarlo en esta fracción de kerosene, eh, la ruta es más corta, es más directa. Porque ya tiene la estructura, no tenemos que hacer como la biomasa que

tenemos que básicamente llegar hasta moléculas muy sencillas para luego sintetizar las moléculas arriba, en este caso partimos de moléculas que son similares son hidrocarburos, son poliolefinas, por lo tanto la ruta, desde mi punto de vista, para la conversión, para llegar hasta el combustible más corta, ahora el el punto clave de entender ahí, y que yo creo que es clave para todos los combustibles que uno pueda pensar, es cuanto es efectivamente su huella de carbono. Porque no son fuentes renovables, pero sí es un residuo, que su alternativa es que vayan a parar a un vertedero y que traigan otros impactos ambientales, entonces el punto clave para determinar qué tan sostenibles son estos combustibles es determinar su huella de carbono efectiva.

Es decir, hoy día nosotros podríamos denominar los combustibles alternativos bajos en carbono, pero podría ser tan competitivo como una fuente renovable si uno hace un buen análisis de ciclo de vida de toda la cadena de valor, de la materia prima hasta el combustible final. Los volúmenes, como la ley REP estipula, son de aquí a un par de años más, se espera que el reciclaje aumente a una, no tengo un número exacto, pero si tenemos 1.000.000 de toneladas anuales de uso de plástico, hoy día se recicla más o menos 11 %, unas 90.000 t que se espera que se llegue a unas 400.000 t de reciclaje. Por lo tanto, se vuelven más interesantes para producir combustible, pero, porque de ese plástico que la ley REP obliga a reciclar, lo obliga a reciclar por la vía mecánica, pero hay un volumen enorme de plástico que no puede ser reciclado con la vía mecánica, porque simplemente las características, las propiedades del plástico, no son aptas para el reciclaje mecánico. Y ahí nosotros pensamos en este reciclaje químico, y en producir productos que sean de alto interés como son los combustibles de aviación. Y en eso hoy día estamos trabajando. El volumen que podamos producir de ahí, si te imaginas una 200.000 t al año, siendo muy conservadores, y de eso tú dices para jet fuel puedes sacar un 30 %, entonces dame la calculadora. . . 2.000 por 0.3, más o menos, estamos hablando de unas 60.000 t, siendo súper conservadores, porque podrías tener unas 100.000 t de combustible desde esos plásticos que son residuales.

F: ¿Esto considerando unas 400.000 t perdón?

C: Considerando unas 200.000 t que puedas reciclar por la vía química y que no compitan con el reciclaje mecánico, pero podría hacer mucho más. El gran problema del plástico para su reciclaje tiene que ver con la logística de su recolección, porque básicamente una densidad muy baja por lo tanto si se establece una buena estrategia, es decir plantas que puedan hacer un procesamiento previo y luego producir un crudo y esto llevarlo a la refinería de petróleo, sería de mi punto de vista logístico, el más apropiado para aumentar ese volumen de combustible que se pueda producir a partir de plástico.

Ahora en torno a neumáticos, ahí la ruta es un poco más larga porque de neumático lo que podemos obtener desde la pirólisis de estos neumáticos, si pensamos en la pirólisis como una de las rutas de conversión, lo que obtenemos mayormente son aromáticos, que eso también es importante para el jet fuel, porque los jet fuel, combustible de aviación, tiene un porcentaje de 26 % en volumen de aromáticos que son necesarios. Por eso muchos de los otros combustibles como el Fisher Tropsch, o como los HEFA, producen una baja proporción de aromáticos, por lo tanto puede ser una proporción para complementar ese otro tipo de combustible. También se pueden obtener aromáticos, o sea perdón alcanos y alquenos alcanos cíclicos de la pirólisis de neumáticos, y ahí los volúmenes son, son, mucho mayores porque, como te decía, al año estamos hablando de un volumen de unos 140.000 t de neumático. De aquí a un par de años más la exigencia es del 100 % de reciclaje del neumático minero, que es

el más importante desde mi punto de vista. Por lo tanto los volúmenes son súper considerables, y ahí sí se puede obtener una fracción importante, para, para combustibles aviación. Y siempre lo he visto desde un punto de vista de, que estos combustibles medianamente refinados pueden terminar de refinarse en la refinería de petróleo, de manera que puedan cumplir con las exigencias de la normativa. Por qué desde ese punto de vista, utilizas infraestructura ya existente, y evitas hacer nuevas inversiones en términos de nuevas plantas.

F: Perfecto. Según entiendo entonces, a partir de, principalmente los neumáticos fuera de uso se está generando realmente un crudo, que puede ser. . .

C: Sí. Ese crudo nosotros lo conocemos bien, porque llevamos rato trabajando en pirólisis de neumático, digo, hay una proporción súper importante de BTX, de compuesto aromático, que vía hidro oxigenación podríamos producir una fracción importante de kerosene de aviación.

F: Por ejemplo, qué tan avanzado está, eh, la madurez tecnológica de estos procesos, en particular en Chile.

C: Bueno, en Chile nosotros no hacemos grandes desarrollos de tecnología, yo diría que llegue acá al mercado como llegue a nivel europeo o norteamericano. Respecto a tecnologías de pirólisis, hoy día hay varias plantas que ya están funcionando, y hay otras tantas que están en carpeta que van a empezar a operar prontamente, porque la exigencia de la ley REP así lo exige. Es decir, los volúmenes de reciclaje son altos. Y por lo tanto, la pirólisis es una de las rutas más fáciles de cumplir con esas metas. De ahí obtienes un crudo que, hoy día, es un crudo, que es un combustible que se está utilizando como un combustible de bajo valor, un combustible industrial. Pero ese combustible puede ser fácilmente refinado hasta Jet fuel, y eso es lo que queda en el camino por desarrollar. Y desde mi punto de vista hay dos caminos, uno es desarrollarlo internamente y otro es adaptar tecnologías que ya existen en el mercado. La ruta más fácil, desde mi punto de vista, entendiendo el crudo que tú tienes y las características del crudo, es adoptar una tecnología que ya existe.

F: Perfecto. Y entendiendo, por ejemplo, que la fuente principal de esta materia prima, en el caso de los neumáticos, que aparentemente es el que mayor porcentaje de rendimiento tendrían en esta comparación entre neumático y plástico, eh, viene de principalmente la zona norte usted considera por ejemplo que habrían dificultades logísticas. Como ocurre con la madera.

C: No. No, porque, a ver, una vez que tú produces el combustible, es decir, si tú instalas tu planta en el norte después la logística para transportar combustibles líquidos está, y la densidad es alta comparada con una biomasa. El gran problema del plástico, del plástico como tal no cuando ya lo transforma en líquido, es que su densidad es muy baja, lo mismo pasa con la madera, la madera tiene una densidad muy baja, entonces transportas aire, u otro problema en la madera que siempre tiene un contenido alto de agua. En el caso de transformar el neumático ya en un combustible, ahora el neumático, el caucho en sí, ya viene altamente densificado, en términos de logística. Ahora si lo transformas a un líquido, como digo, la logística de transporte de combustible líquido está.

F: Esto es mediante el uso de camiones por ejemplo, o sería mediante el uso de cañería, ya sea. . .

C: Si tú lo piensas, desde la traerlo hasta la zona central, me imagino que mediante el barco

porque es la opción más óptima. O instalar la planta de refinación allá en el norte, y bueno tendría que llegar hasta la quinta región donde está la otra planta de refinería.

F: Y por ahí va mi duda, eh, porque las refinerías de Chile están en la zona centro, nosotros estamos hablando de materia prima que se está ubicando particularmente la zona norte, entonces entro ahí en el pro y contra de “yo creo que combustible en la zona norte cerca de la zona de producción de materia prima” o aparentemente resultaría más conveniente transportar la materia prima hasta la zona centro.

C: Mira ahí hay dos cosas que todavía no lo tengo tan resuelto desde mi punto de vista, de cómo planificar un proyecto como este. Porque tenemos la refinería de petróleo, y lo que ha pasado en otros países es que todos estos productos, sobre todo los de producción de HEFA, siempre están muy ligados a las refinerías. Ahora en Chile, yo no sé qué tan abierto es que en esta empresa del petróleo pueda tomar este crudo y transformarlo, y refinarlo para Jet Fuel. O sea, hoy día ellos, ENAP, están interesados en adaptar tecnología para producir jet fuel. O sea, lo están evaluando, pero no sé qué tan factible es que puedan refinar otros tipos de crudos. Eso tiene otras limitaciones que son desde el punto de vista político, desde el punto de vista de la estrategia de la propia compañía, etcétera. Entonces ahí hay otro punto de limitación, y entonces uno podría pensar, si yo tengo en el norte, hoy día se traen neumáticos del norte hasta la zona central para procesarlos. O sea, los traen hasta aquí, hasta Penco, hasta aquí en la octava región. Pero en un futuro podrías decir, o sea puedo instalar una refinería en el norte pensando no solo en estos combustibles, porque además de producir combustibles de aviación siempre tienes otras fracciones de gasolina y de diésel. O incluso combustibles para barcos, o sea habría que pensar en un proyecto mucho más ambicioso de ese punto de vista. Porque tu producto principal puede ser el jet fuel, pero junto con el jet fuel vas a producir otros cortes de combustible.

F: Perfecto. Y ya entrando como el último minuto de la entrevista, preguntarle cuál es, más o menos, el tamaño por ejemplo que tiene, o tendría, una planta de producción a partir de neumáticos fuera de uso o plástico, en términos de puede ser esta modular, se requiere ahí un capex más grande para comenzar el proyecto.

C: Mira, las plantas que nosotros estamos pensando, las plantas de pirólisis de plástico son plantas modulares pequeñas, o sea no modulares, estoy hablando tamaño de procesamiento de, no sé, de unas 10.000 t a 20.000 t al año, de unas 30.000 toneladas al año. Estamos hablando de plantas más pequeñas por el tema de los logístico también, las plantas de neumático hoy día, de pirólisis de neumáticos, solo de pirólisis, que es como la primera etapa porque después está la etapa refinación. Estamos hablando de plantas que son chicas, hoy día, las que tenemos implementadas en Chile son plantas de batch de 10 t a 15 t por batch...

F: Perfecto.

C: Por día más o menos, entonces son plantas relativamente pequeñas. Entonces los capex no son tan elevados, por eso también la tecnología ha estado tomando mucha mucha fuerza porque en términos de inversión no son tan elevadas y las plantas son de un tamaño acotado, no son plantas supergigantes.

F: Perfecto. Eh, la verdad es que no me quedan más preguntas de las que yo tenía anotadas, agradecerle nuevamente su tiempo, y bueno muchas gracias. Con eso no sé si usted tendrá

algo más que agregar para esta entrevista.

C: No. No mucho más, yo te agradezco el que me hayas considerado para esta entrevista y agradecerte que me hayas esperado.