



Universidad del Bío-Bío
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería en Maderas
Escuela Ingeniería Civil Química



EVALUACIÓN AMBIENTAL DE LA PRODUCCIÓN DE PELLETS EN CHILE

Informe de Habilitación Profesional presentado en conformidad a los requisitos
para obtener el título de Ingeniera Civil Química

CAROLINA GALLARDO FIGUEROA

Profesora Tutora: Dr. Mabel Vega Coloma

Ingeniera Supervisora: Dr. Cristina Segura

Concepción, 06 de Octubre del 2021.

RESUMEN

En los últimos años, el uso de biomasa forestal como materia prima para la fabricación de los pellets de madera ha crecido significativamente, lo que ha traído consigo un gran interés en conocer las potenciales cargas ambientales asociadas al ciclo de vida de este producto, en particular de su producción. La aplicación de la metodología de evaluación del ciclo de vida (ECV) para cuantificar las cargas ambientales ha demostrado ser una de las herramientas más efectivas para realizar análisis de impacto ambiental de cualquier proceso o sistema. De acuerdo con evidencia internacional, de estudios de evaluaciones ambientales o de ciclo de vida sobre la producción y uso de pellets, se ha obtenido que tienen menor carga ambiental que las fuentes de combustibles fósiles convencionales. Sin embargo, en Chile no se tiene información sobre las cargas ambientales que produce la fabricación de este biocombustible. Este trabajo de habilitación profesional tuvo como objetivo evaluar los impactos ambientales relacionados con la producción de pellet de madera mediante la metodología de análisis de ciclo de vida. Para el caso estudio se estableció un alcance de la cuna a la puerta del análisis de ciclo de vida, que incluyó etapa de producción de la materia prima, la etapa de transporte a la planta y el proceso de producción de pellet, cubriendo las operaciones unitarias de tamizado primario, secado, molienda, pelletizado y harneo. La unidad funcional establecida fue de la producción de 1 kg de pellet de madera de pino radiata. Los datos de inventario utilizados se obtuvieron de empresas productoras de pellet de las regiones de la Araucanía y del Biobío, de declaraciones de impacto ambiental, de la base de datos Ecoinvent V3.5 y fueron introducidos en el software SimaPro 9 utilizando el método ReCiPe 2016 *Midpoint* (H) V1.1 para la caracterización y normalización de 7 categorías de impacto del caso estudio. Además, se realizó una comparación de las etapas del proceso. De los resultados de la caracterización se observaron que las operaciones de producción de materia prima y transporte contribuyen entre un 8% y un 3% aproximadamente en las categorías de impacto analizadas. Por otra parte, el uso de electricidad en la etapa de producción de pellets fue la responsable de la mayor parte de cargas ambientales contribuyendo con un porcentaje superior al 80% en la mayoría de las categorías de impacto. Los resultados de normalización de las categorías de impacto mostraron que la eutrofización de agua dulce y la formación de partículas finas son las más relevantes en el perfil. En la comparación de las etapas directas del proceso el análisis mostró que las etapas de secado, molienda y pelletizado obtienen los mayores impactos en las categorías estudiadas. Lo anterior,

permite identificar dichas etapas como una oportunidad de mejorar el proceso global de la producción de pellet, enfocándose en una gestión modulada para estas etapas con el propósito de reducir efectivamente sus impactos al medio ambiente.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por apoyarme durante toda mi formación académica. En especial a mi madre, Sara, gracias a todo su amor, esfuerzo, apoyo, dedicación, sacrificio y paciencia, pudiera culminar con éxito esta etapa de mi vida. Ella me hizo quien soy yo hoy en día, infinitas gracias mamá. A mis hermanos Eduardo y Cristóbal, por siempre ser mi apoyo y pilares más importantes toda mi vida. A mi padre y mi sobrino Cristóbal. Los amo.

Agradecer a Nicolás, mi compañero, mi mejor amigo, el amor de mi vida, quien me ha acompañado estos últimos 10 años haciéndome parte de su vida y su familia, estando en momentos importantes de mi vida, dándome su amor, su fuerza, su paciencia y su apoyo incondicional. Es la persona que estuvo a mi lado en la elaboración de esta Habilitación Profesional, convirtiéndose en mi apoyo e inspiración. Eres mi felicidad. Te amo.

A mis amigos de infancia, en especial a Camila y Valentina, por estos más de 15 años de amistad incondicional, por ser como son, porque juntas hemos compartido alegrías y tristezas dándonos siempre el apoyo y ayuda necesaria, y que a pesar de que no nos veamos muy seguido siempre están ahí, de verdad no pude haber tenido mejores amigas que ustedes.

También a mi grupo de amigos de universidad, María Fernanda, Sebastián, Josseline, Javier, Lucas, Eric y Milton, por sus consejos y apoyo brindado a lo largo de nuestra formación profesional, especialmente por compartir momentos inolvidables estos últimos años que me dejaron muchas alegrías que jamás olvidaré.

Agradecer el financiamiento ANID-PIA APOYO CCTE AFB170007, a la Unidad de Desarrollo Tecnológico y a mi supervisora la Dra. Cristina Segura por darme la oportunidad de realizar mi habilitación profesional. A mi profesora guía Dra. Mabel Vega por brindarme su apoyo y consejo, dándome la información necesaria y guiándome en todo momento para el desarrollo de este trabajo. Finalmente, pero no menos importante, a mis profesores, tanto de bachillerato como de ingeniería química, que marcaron con sus enseñanzas mi futuro, dando siempre una mano de ayuda.

NOMENCLATURA

AT	Acidificación terrestre.
AO	Agotamiento del ozono.
ACV	Análisis de Ciclo de Vida.
AChBiom	Asociación Chilena de Biomasa.
CG	Calentamiento Global.
CA	Consumo de Agua
CO ₂	Dióxido de carbono.
SO ₂	Dióxido de azufre.
ERNC	Energías Renovables No Convencionales.
EF	Escasez de recursos fósiles
EEA	<i>European Environment Agency.</i>
EAD	Eutrofización de agua dulce
EM	Eutrofización marina.
ECV	Evaluación de ciclo de vida.
EICV	Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida.
GEI	Gases de efecto invernadero.
INFOR	Instituto Forestal
ICV	Inventario de Ciclo de Vida.
ISO	<i>International Organization for Standardization.</i>
MP ₁₀	Material particulado con partículas menores a 10 micrómetros.
MP _{2,5}	Material particulado con partículas menores a 2,5 micrómetros.
MMA	Ministerio del Medio Ambiente.
MinEnergía	Ministerio de Energía.
CO	Monóxido de carbono.
NO _x	Óxido de nitrógeno.
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático.
SEIA	Servicio de evaluación de impacto ambiental.
SIC	Sistema eléctrico Interconectado Central.
US-EPA	<i>United States Environmental Protection Agency.</i>

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	i
AGRADECIMIENTOS	iii
NOMENCLATURA	iv
1. INTRODUCCIÓN	1
2. PLANTEAMIENTO DE LA SITUACIÓN PROBLEMA.....	4
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	6
3.1 Pellets de Madera.....	6
3.2 Producción de pellets a nivel global y nacional.....	6
3.2.1 Proceso de producción de pellets en Chile	9
3.2.2 Emisiones y perfil ambiental del proceso de producción de pellets.....	13
4. OBJETIVOS	16
4.1 Objetivo general.....	16
4.2 Objetivos específicos	16
5. METODOLOGÍA.....	17
5.1 Análisis de Ciclo de Vida	17
5.2 Definición de objetivos y alcances	19
5.3 Evaluación del inventario de ciclo de vida (ICV).....	21
5.3.1 Recolección y cálculo de datos.....	21
5.3.2 Entradas y salidas de proceso.	22
5.4 Evaluación de impacto de ciclo de vida (EICV).....	24
5.5 Interpretación de la evaluación de impacto de ciclo de vida	26
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
6.1 Objetivos y alcance de este estudio	28

6.1.1	Sistema-producto de caso estudio.....	28
6.1.2	Límites del sistema	29
6.1.3	Tipo de fuente y requisitos de calidad de datos.....	30
6.1.4	Supuestos y limitaciones.....	32
6.2	Inventario de ciclo de vida.....	33
6.2.1	Obtención de datos de entradas/salidas de proceso	33
6.2.2	Inventario de ciclo de vida global.....	35
6.3	Evaluación e interpretación de impacto de ciclo de vida en el caso estudio	36
6.3.1	Calentamiento global (CG).....	38
6.3.2	Agotamiento del ozono (AO)	39
6.3.3	Formación de partículas finas (FPF).....	39
6.3.4	Acidificación terrestre (AT).....	39
6.3.5	Eutrofización de agua dulce (EAD) y marina (EM).....	40
6.3.6	Escasez de recursos Fósiles (EF).....	40
6.3.7	Comparación de impactos por etapas de proceso	41
6.3.8	Comparación de categorías de impactos a través de la normalización.....	42
6.4	Comparación de los datos de producción de pellet con otras producciones de combustibles fósiles convencionales.	43
6.5	Medidas de gestión ambiental para el proceso de producción de pellets	45
7.	CONCLUSIÓN, RECOMENDACIONES Y LIMITACIONES	46
7.1	Conclusiones.....	46
7.2	Recomendaciones y limitaciones.....	47
7.2.1	Recomendación.....	47
7.2.2	Limitaciones	47
8.	REFERENCIAS	48

ANEXOS	57
Anexo A: Propiedades materia prima y del pellet.	57
Anexo B: Balance de materia y energía de proceso de producción del pellet.....	59
Anexo C: Resultados numéricos obtenidos de la recopilación de entrada/salida del proceso y datos de inventario que se introducen al Software SimaPro 9.....	67
Anexo D: Resultados numéricos obtenidos de la evaluación de impacto del Software SimaPro.	70
Anexo E: Resultados numéricos de la comparación entre diferentes producciones de combustibles numéricos obtenidos del Software SimaPro.....	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Proyección de la demanda de consumo de pellet en Chile (AChBiom, 2017).....	7
Tabla 2. Categorías e indicadores de impacto utilizados en el estudio.....	26
Tabla 3. Datos primarios y secundarios considerados en el caso estudio.....	31
Tabla 4. Resumen general de las entradas y salidas de la tecnosfera de operaciones unitarias del proceso relacionada con unidad funcional de 1kg de pellet.	34
Tabla 5. Resumen general de las entradas y salidas de la tecnosfera del proceso relacionada con unidad funcional de 1kg de pellet.	35
Tabla 6. Resultados de las categorías de impacto relevantes en el proceso global.	37
Tabla 7. Características aserrín Pino Radiata.	57
Tabla 8. Propiedades de los pellets de madera.	57
Tabla 9. Tiempos de producción de la planta.	65
Tabla 10. Consumo eléctrico por etapa de proceso.	66
Tabla 11. Datos de características del transporte de materia prima.....	67
Tabla 12. Resumen etapa de tamizado primario.....	67
Tabla 13. Resumen etapa de secado.	67
Tabla 14. Resumen etapa de molienda	68
Tabla 15. Resumen etapa de pelletizado.....	68
Tabla 16. Resumen etapa de enfriado.....	68
Tabla 17. Resumen etapa de harneo	69
Tabla 18. Caracterización de las categorías de impacto y factores de normalización del método ReCiPe 2016 Midpoint V1.1 (H).....	70
Tabla 19. Resultado de caracterización las categorías de impacto del proceso global.....	70
Tabla 20. Resultado de normalización las categorías de impacto del proceso global.....	71
Tabla 21. Resultado de las categorías de impacto relevantes del proceso global en relación a los subsistemas.	72
Tabla 22. Resultado de caracterización de las categorías de impacto mediante comparación de etapas del proceso.	73
Tabla 23. Resultados comparación de combustibles	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Crecimiento de la producción de pellets de madera en 2019 con respecto al año 2018.	6
Figura 2. Incremento en la capacidad instalada de toneladas al año 2030 (AChBiom, 2019).	8
Figura 3. Esquema general de la elaboración de pellets de madera (elaboración propia).	10
Figura 4. Alcances de ciclo de vida según alcance del ACV (ISO:14001).	18
Figura 5. Entrada/salida de proceso de un sistema (Yuste, 2014).	23
Figura 6. Mecanismo ambiental: relación entre inventario, impactos de efecto intermedios “midpoint”, impactos de efecto final “endpoint” y áreas de protección.	25
Figura 7. Etapas de ciclo de vida incluidas en los límites de sistema del ACV del caso estudio.	29
Figura 8. Límites del sistema del caso estudio (elaboración propia).	30
Figura 9. Esquema de la etapa de secado (González & Pucciarelli, 2019).	60
Figura 10. Análisis de Red caracterización de calentamiento global como impacto.	72

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Caracterización de categorías de impacto más relevantes del proceso global.	37
Gráfico 2. Comparación por etapas del proceso en relación a la ecotoxicidad terrestre.	41
Gráfico 3. Comparación por etapas del proceso productivo en función a la categoría del CG.	42
Gráfico 4. Normalización de impacto del proceso global	43
Gráfico 5. Comparación de combustibles en relación al impacto de calentamiento global, unidad funcional de 1 MJ.	44
Gráfico 6. Comparación de combustibles en relación al impacto escasez de recursos fósiles, unidad funcional de 1 MJ.	44

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el consumo y producción de la energía ha aumentado, debido al crecimiento económico, aumento de población, incremento de capacidad productiva, entre otros (Deloitte, 2016). La energía es producida a partir de recursos renovables y no renovables, no obstante, en la actualidad la mayor cantidad de energía consumida en Chile proviene de fuentes no renovables, como el petróleo, el carbón y el gas natural. El uso de estos combustibles provoca altos niveles de dióxido de carbono (CO_2) a la atmósfera con una alta participación del 70% en la matriz energética primaria (Seebach, 2019), siendo el petróleo la principal fuente de gases de efecto invernadero (GEI) (MinEnergía, 2017). A pesar de esto, los combustibles fósiles han ido perdiendo moderadamente, participación en la matriz energética primaria, dando paso a la presencia de nuevas fuentes energías renovables, limpias y eficientes, entre ellas, la biomasa (Yilmaz & Selim, 2013). La biomasa se ha convertido en una de las energías renovables clave en el proceso de descarbonización de la matriz, representando el 24,7% y ocupando el segundo lugar dentro de la matriz primaria del país (O'Ryan, 2020), con una participación del 18% del sector industrial y un 27,2% del sector comercial, público y residencial (CPR) (Huber et al, 2019).

De hecho, la participación de la biomasa en la matriz energética ha aumentado debido a que se ha convertido en una fuente de generación de energía eléctrica y térmica, mediante las operaciones de plantas generadoras de electricidad, junto al desarrollo de la cogeneración asociada a la industria forestal (O'Ryan, 2020).

La utilización de fuentes de energías limpias y eficientes como la biomasa trae consigo ventajas medioambientales, como:

- En comparación con otros combustibles fósiles serían la flexibilidad y adaptabilidad, que la convierten en un valioso componente de un sistema de energía eléctrica que avanza hacia la descarbonización gradual (Doussoulin, 2007).
- Disminución de las emisiones contaminantes de azufre, CO, HC, NOx y material particulado. Esto se debe a la composición de la biomasa y a los equipos de combustión modernos, los cuales generan menos partículas contaminantes (Paneque et al, 2011).

La biomasa, principalmente forestal, originada a partir de los subproductos de los bosques e industria de la madera ha permitido que alrededor de una tercera parte de la población mundial la utilice en el sector domiciliario para calefaccionar viviendas (Tapia, 2019).

A pesar de que la biomasa forestal residual tanto de cosecha como de aserraderos eran considerados un desecho, y, por ende, un problema y un costo, actualmente tales desechos son considerados materia prima. Este tipo de biomasa tiene como principal actor los chips en el sector industrial, luego en el sector domiciliario, la leña; hoy en día en ambos sectores se ha introducido el formato de pellets de madera.

Si en el sector domiciliario, se compara la leña; principal combustible utilizado en la zona centro-sur del país, con el pellet, este último presenta algunas ventajas medioambientales; menores cargas ambientales con bajos índices de humedad y alta densidad energética, que a su vez puede reducir emisiones de contaminantes globales, responsables del cambio climático (Díaz, 2017). Si bien la leña presenta menos costos económicos y una fácil accesibilidad, su mal uso la ha convertido en una fuente de generación altamente contaminante, provocando altos niveles de contaminación por materia particulado fino ($PM_{2,5}$), principalmente en las regiones centro-sur del país. Esto generó que el gobierno impulse planes de descontaminación atmosférica y programas de recambio de estos calefactores por otros más eficientes y con otros tipos de combustibles renovables en el sector CPR (Ministerio de medio ambiente [MMA], 2014) en zonas con ciudades saturadas del país.

El pellet en los últimos años ha presentado un aumento en su producción y consumo, creciendo en un 45,5% entre el año 2016 y el 2019 (Asociación Chilena de Biomasa [AChBiom], 2019) debido a sus ventajas medioambientales para calefacción domiciliaria, institucional o industrial, lo que ha significado la incorporación de nuevos actores al mercado. Por lo que, una alternativa para el reemplazo gradual de la leña y reducir los altos niveles de contaminación en sectores CPR, es este biocombustible (Díaz, 2017).

En vista de que el uso de pellet de madera ha aumentado, conocer y cuantificar los impactos medioambientales que implica su ciclo de vida ha provocado un interés a nivel mundial y una manera de hacerlo es implementar la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV); la cual es reconocida internacionalmente para evaluar los impactos ambientales relacionados al ciclo de vida de un producto o sistema, permitiendo identificar, cuantificar y analizar ambientalmente todas las entradas y salidas involucradas en la producción, uso y disposición de un producto mejorando así la eficiencia de la producción de un producto o sistema (ISO 14040:2006).

Existe una abundante bibliografía científica a nivel internacional sobre las cargas ambientales en torno a la producción y uso de pellets de madera, considerando diferentes alcances para la metodología ACV. Por ejemplo, se ha estudiado que la carga ambiental de la energía eléctrica generada a partir de biomasa es menor que las fuentes fósiles tradicionales (Gaete-Morales et al., 2018), trayendo un beneficio ambiental al usar este biocombustible. Por otra parte, se han comparado ambientalmente diferentes producciones de pellets con y sin etapa de torrefacción con enfoque ACV, demostrando que el uso de pellet torrefactado tiene menores cargas ambientales, reduciendo en GEI en algunas categorías de impacto, como el calentamiento global (Adams et al., 2015). También, se ha evaluado la producción de pellet en plantas a diferentes escalas, donde categorías de impacto como la escasez de fuentes fósiles, la eutrofización del agua dulce y la eutrofización marina presentan contribuciones que van del 46% al 64% del impacto total (Quinteiro et al., 2019). Además, se ha estudiado las cargas que produce el transporte de este biocombustible a centros de distribución y los posibles impactos ambientales de su uso en diferentes calderas (Magelli et al., 2009), entre otros estudios.

Sin embargo, a nivel nacional falta información sobre el perfil medioambiental en relación a la cadena de valor de la producción de pellets. No hay estudios que cuantifiquen los posibles impactos ambientales del ciclo de vida de la producción de este biocombustible ni mucho menos con enfoques a la metodología ACV, por lo que los productores no poseen datos específicos de sus parámetros ambientales asociados. De esta manera no hay información ambiental para sus productos que considere las condiciones locales y, por lo tanto, no la pueden usar para diferenciarse de sus competidores. Debido a esto, la Asociación Chilena de Biomasa (AChBiom), que reúne a los principales productores de pellets y empresas proveedoras de equipos a pellet, ha detectado esta necesidad y ha solicitado a la Unidad de Desarrollo Tecnológico (UDT), como uno de sus asociados, realizar un estudio de evaluación ambiental de la producción de pellets.

Por lo tanto, este estudio desarrolló una primera aproximación de la producción de pellets con enfoque de ciclo de vida, considerando un alcance de la cuna a la puerta, con el propósito de poder entregar a los productores un perfil ambiental de parámetros cuantificados de la producción de este biocombustible. A futuro se espera poder expandir el alcance de este trabajo y obtener un perfil más amplio de éste, para comparar los resultados de la carga ambiental con otros resultados ya reportados para combustibles fósiles sustitutos, siguiendo la metodología definida por la Norma ISO 14.040-44:2006 para Evaluaciones de Ciclo de Vida (ECV).

2. PLANTEAMIENTO DE LA SITUACIÓN PROBLEMA

A lo largo de los años la población a nivel mundial ha crecido considerablemente, el desarrollo de la vida humana ha evolucionado ya sea en el desarrollo de nuevas tecnologías y en mejorar la calidad de vida de las personas; con el fin de cubrir las diferentes necesidades que se presentan cotidianamente (Instituto Sindical de Trabajo, Ambiente y Salud [ISTAS], 2021). Esto ha provocado, entre otras cosas, un aumento en la demanda de fuentes de energías, principalmente provenientes de combustibles fósiles convencionales. Si bien, el uso de fuentes de energías es esencial para el desarrollo social y económico de la población, éstas generan una gran cantidad de contaminantes a lo largo de su cadena de valor, los cuales son responsables en gran parte del calentamiento global, provocando un gran impacto medioambiental y efecto en la salud de las personas (MinEnergía, 2017). Por lo que surge la necesidad de incorporar el uso de fuentes limpias y renovables de energía, para disminuir el consumo de combustibles fósiles convencionales y reducir los impactos ambientales que producen (Comisión Nacional de Energía [CNE], 2007).

Una fuente de energía es la biomasa; principalmente la biomasa forestal, la cual en los últimos años ha sido aprovechada como recurso renovable para la producción de electricidad y/o calor (Martinez, 2009). A partir de ella se puede obtener una gran variedad de productos como por ejemplo el pellet, que se adaptan a todos los campos de utilización actual de los combustibles tradicionales. Pueden utilizarse para cubrir las necesidades energéticas de la industria incluyendo la generación de electricidad y principalmente en el sector domiciliario como calefacción (Romero, 2010).

El crecimiento del consumo de pellets ha implicado que se incorporen nuevas plantas de producción y el mercado crezca, por lo que, la aplicación de un estudio de ECV para evaluar los impactos ambientales de la fabricación de pellets de madera siguiendo los procedimientos estipulados por las normas ISO 14040-44:2006 se puede convertir en una herramienta de gestión ambiental de suma utilidad para quienes toman decisiones en las mejoras de los procesos y/o servicios. De la misma forma, esta metodología se puede emplear por si sola o juntamente con otras herramientas tales como la evaluación del riesgo y la evaluación del impacto ambiental (Romero, 2003). Es necesario poder generar información validada y documentada, que permita obtener un perfil ambiental del ciclo de vida del pellet en Chile y así, poder compararlo en igual dimensión con el de otros combustibles.

Si bien en Chile no existen estudios sobre evaluaciones ambientales de pellets con enfoque de ciclo de vida, es posible desarrollar un análisis con información local de parámetros específicos de producción. Es por ello que nace la iniciativa por parte de Asociación Chilena de Biomasa junto con empresas proveedoras y productores de pellets a nivel nacional por enfrentar este problema y solicitar al centro de investigación Unidad de Desarrollo Tecnológico realizar un estudio de evaluación ambiental de la producción de pellets con enfoque de ACV.

Por lo tanto, este trabajo de habilitación profesional tiene como propósito evaluar el proceso productivo de pellets de madera siguiendo la metodología ACV, considerando una perspectiva de la cuna a la puerta, como una primera aproximación al problema. Este trabajo permitirá espacio para que en un futuro se expanda el alcance del estudio, permitiendo precisar mejor aún los impactos en el ciclo de vida completo de producción de pellet de madera.

Se espera que el impacto de este estudio sea útil para las industrias relacionadas con el sector forestal y también para el sector energético del país.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 Pellets de Madera

El pellet de madera se puede definir como un “biocombustible sólido, generalmente de forma cilíndrica, fabricado a partir de madera pulverizada sin tratar, extraída del conjunto del árbol y aglomerada con o sin ayuda de ligantes” (MMA, 2017). Para pellet de uso residencial y comercial de baja escala se requiere utilizar madera natural sin aditivos, para lograr un producto que cumpla con las exigencias de calidad establecidas en la norma UNE EN ISO 17225-2. Dentro de los parámetros más relevantes exigido se puede mencionar el contenido de humedad bajo 10%, durabilidad mecánica sobre 97,5%, poder calorífico sobre 4520 kcal/kg, el contenido de cenizas bajo 1% y una densidad de 670 kg/m³.

3.2 Producción de pellets a nivel global y nacional

De acuerdo al Informe de Pellets sobre la Perspectiva Europea de la Bioenergía (2020) declara, que:

“La producción mundial de pellets está creciendo continuamente desde sus inicios, mostrando un crecimiento del 12% entre 2018 y 2019. Los países de América del Sur (Brasil y Chile) son las áreas que se están expandiendo más rápidamente con tasas de crecimiento del volumen de producción de pellets del 21% en 2019 (en comparación con 2018). Las cifras de mayor crecimiento de la producción en volúmenes absolutos provinieron de América del Norte (EE. UU.) con 1.264.000 toneladas/año y de la UE28 (Alemania) con 405.000 toneladas/año” (ver Figura 1. Crecimiento de la producción de pellets de madera en 2019 con respecto al año 2018.).

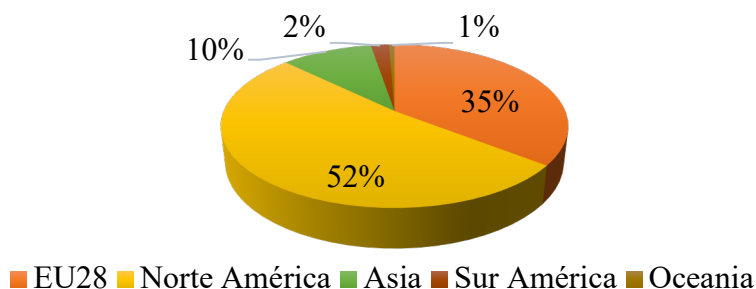


Figura 1. Crecimiento de la producción de pellets de madera en 2019 con respecto al año 2018.

A nivel mundial su producción ha aumentado, en países europeos y en Estados Unidos su consumo se centra en la calefacción en uso doméstico y en países como Suecia, Dinamarca y Países Bajos principalmente su consumo se centra en la producción de energía térmica para sectores industriales (Cocchi et al, 2011).

Respecto a Chile, éste se ha convertido en uno de los dos países de América del Sur con mayor desarrollo en la producción de pellet (*Bioenergy Europe*, 2020), alcanzando las 144.359 toneladas el año 2019, un aumento de un 26,9% respecto al año 2018 (AChBiom 2019). Además, está experimentando un crecimiento de la capacidad de producción y a partir del año 2020 se pretende incorporar tres nuevas plantas (total de 340.000 t/año de capacidad) (*Bioenergy Europe*, 2020). Esto se debe al aumento de consumo de pellet en sectores CPR, lo que a su vez se ha incrementado debido a los programas de descontaminación asociados a los problemas medioambientales, que ha implementado el Ministerio del Medio Ambiente. Estos problemas ambientales en general son atribuibles al mal uso de la leña, que genera una alta contaminación por la quema deficiente de ésta entre las regiones O'Higgins y Aysén del país (Porflit, 2018). Se espera que la demanda del pellet siga creciendo significativamente, así como lo muestra la proyección realizada el 2014 por el Ministerio del Medio Ambiente para el periodo 2016-2025 (MMA, 2014), la que se muestra en la Tabla 1 para los años 2020 a 2025:

Tabla 1. Proyección de la demanda de consumo de pellet en Chile (AChBiom, 2017).

Demanda en toneladas/año						
	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Doméstico	114.652	147.617	169.521	190.780	212.219	233.142
Institucional	25.403	28.197	31.299	34.429	37.527	40.529
Industrial	14.944	16.438	18.082	19.890	21.879	24.067
Total	154.998	192.252	218.902	245.099	271.626	297.739

De acuerdo con la Tabla 1, se espera que al 2025 la demanda de pellet para uso doméstico aumente en un 86%, para uso institucional en un 62,2% y para uso industrial en un 57,6%, con respecto al año 2016. Actualmente, el porcentaje de consumo de pellets en Chile en los tres segmentos son domiciliario 82% y 18% en los segmentos Institucional e Industrial (INFOR, 2020).

La producción de pellets está distribuida en 9 regiones del país con 23 productores, donde las principales regiones productoras son la Región de Biobío y la Región de la Araucanía, aportando un 30,4% y 17,4%, respectivamente del total producido el año 2019 (INFOR, 2020). Donde los

líderes principales de producción son las empresas ECOMAS, la cual abastece el 34% del mercado, le siguen Andes Bio-Pellet y Traiguén Energy con un 13 y 10%, respectivamente (Escobar & Weil, 2018).

En cuanto a la capacidad instalada, según las proyecciones de la AChBiom (2019) (Figura 2) se espera que al 2030 aumente considerablemente, ya que el 70% de las empresas productoras tienen planes de ampliación para los años venideros. Se podría tener al 2030 una capacidad instalada superior al millón de ton/año.

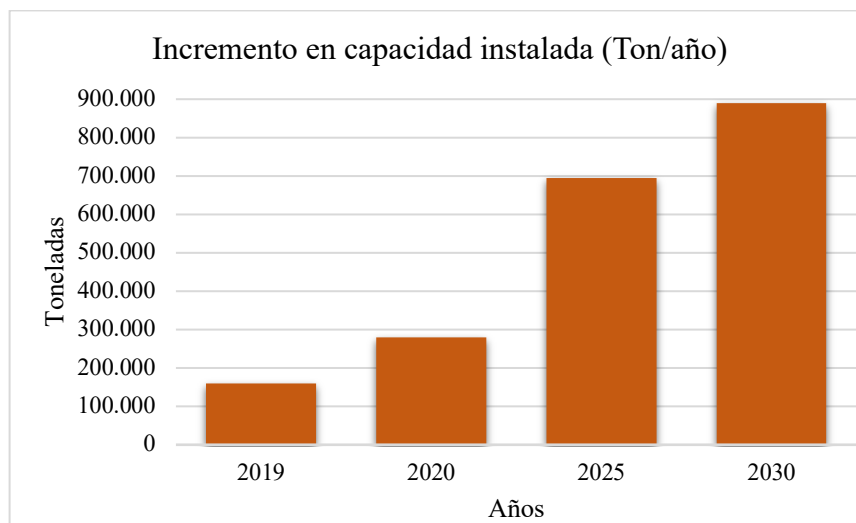


Figura 2. Incremento en la capacidad instalada de toneladas al año 2030 (AChBiom, 2019).

La producción nacional de pellets se caracteriza por utilizar aserrín de pino radiata como materia prima principal, gracias a su abundancia, características y propiedades que posee. Esta proviene de la industria maderera en su gran mayoría y es designada como un subproducto energético. En menor medida, existen productores que utilizan otras especies como pino oregón, lenga o eucalipto, pero representan un porcentaje menor del mercado.

La producción de pellets de madera en Chile tiene como objetivo obtener pellets de madera de buena calidad que posteriormente serán vendidos para ser utilizados como combustible de plantas térmicas o de sistemas de calefacción domésticos que produzcan bajas emisiones al ambiente.

Las plantas productoras generalmente tienen su elaboración de pellets junto a aserraderos y plantas de remanufactura de madera de pino o en un radio cercano a ellas donde obtienen la materia prima para el proceso. La mayoría de las empresas usan virutas y aserrín seco de sus propios centros de aserrío, pero hay plantas que no alcanzan a completar su volumen de producción con la materia prima seca que tienen por lo que deben comprar a terceros para completarla. Sin embargo, la baja

oferta de este subproducto seco ha generado un alto costo de éste junto con el riesgo de que al comprarlo contenga impurezas o materiales ajenos que dañen alguna maquinaria o el producto final (Escobar & Weil, 2018).

Una alternativa para el problema de la limitada disponibilidad del aserrín seco, es la utilización del aserrín húmedo que producen aserraderos y plantas elaboradoras de madera el cual es mayor volumen que el aserrín seco, por lo que de acuerdo con INFOR (2016) a nivel nacional, por cada m³ sólido de viruta y aserrín de elaboración (seco) se producen 7,8 m³ sólidos de aserrín húmedo. Este residuo húmedo lleva consigo una gran inversión al implementar la etapa de secado en la cadena del proceso. Aunque existen empresas que utilizan este subproducto ya que cuentan con sus propios secadores, lo que ha llevado a aumentar su producción de pellets (Escobar & Weil, 2018).

3.2.1 Proceso de producción de pellets en Chile

Las plantas productoras de pellets tienen variantes en cuanto a la obtención de su materia prima. Sin embargo, el proceso de producción de este biocombustible es casi similar y se diferencian en la utilización de la operación unitaria de secado. Por lo tanto, este proceso se compone de una serie de etapas físicas, las cuales incluyen la preparación de la materia prima a partir de la reducción de tamaño y secado de los residuos, para luego densificarlos según las especificaciones requeridas, dando origen a los pellets de madera. A continuación, se presenta el diagrama general del proceso de producción de pellets en Chile (Figura 3), seguido de la descripción de cada etapa.

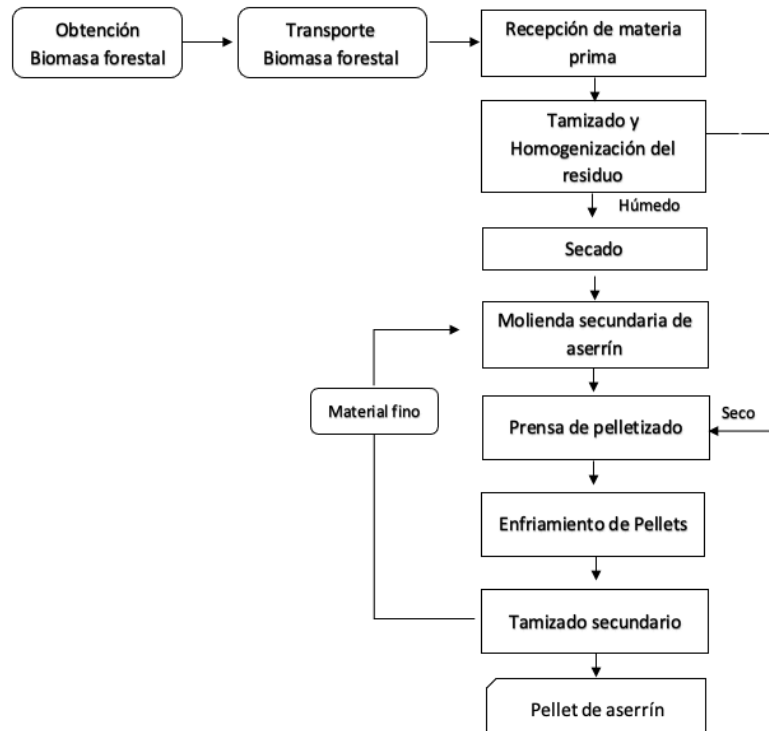


Figura 3. Esquema general de la elaboración de pellets de madera (elaboración propia).

A continuación, se describirán por separado cada una de las etapas del proceso de producción del pellet de madera que se consideran en el caso estudio.

a. Recepción de la materia prima, homogenización y tamizado primario.

La recepción de la materia prima es la primera etapa en el proceso. La materia prima compuesta de aserrín, virutas o residuos de madera es clasificada según su granulometría y humedad. Ésta pasa por un tamiz para eliminar elementos extraños que pueda contener (alrededor del 1%), como residuos metálicos y dependiendo del tamaño la materia prima es introducida a molinos primarios para reducir su tamaño y facilitar su manipulación antes de continuar el proceso. Luego es almacenada en silos o almacenes de techo cerrado, para tener un ambiente aislado de contaminantes externos. En el caso del aserrín, se utiliza un sistema de almacenamiento cubierto, lo que permite la protección de la materia prima de pérdidas o daños causados por vientos y lluvia.

b. Secado

El secado es una etapa que puede o no estar presente, esto depende de la humedad que contenga la materia prima, la cual varía entre 35% a 70%. Un contenido de humedad alto puede tener un efecto

negativo en el producto final, influyendo en el poder calorífico, fragilidad y en el rendimiento que tendría el pellet en calderas. Por lo que utilizar aserrín húmedo con porcentajes de humedad altos, debe pasar por la etapa de secado para eliminar el exceso de agua de la materia prima y así conseguir un aserrín seco con un porcentaje máximo de 10% de humedad para la elaboración de pellet de buena calidad. Cabe señalar que el agua extraída de este proceso se evapora, por lo tanto, no se generan residuos industriales líquidos (Fredes, 2014).

El proceso de secado a que se somete la materia prima puede ser mediante secado natural o forzado (secadores trómel o secadores rotatorios de secado directo e indirecto). En la actualidad el sistema de secado forzado es el más utilizado y puede ser por secado en banda o secado directo con trómel. El primero tiene la ventaja de ser realizado a bajas temperaturas, evitando el tostado o quemado, reduciendo el consumo de energía, el riesgo de incendio y las emisiones contaminantes. Sin embargo, para cantidades elevadas de humedad esta tecnología es menos eficiente que el secado con trómel (González, 2012), siendo por esta razón esta última una tecnología mucho más extendida. La principal desventaja del secado con trómel es que permite un menor control sobre el proceso, aumenta el contenido de cenizas en los pellets y la lignina de la madera sufre una mayor alteración al entrar en contacto directo con gases a alta temperatura, además de requerir sistemas de limpieza de gases si la energía térmica utilizada proviene de un horno de biomasa.

Se debe tener en cuenta que el producto final debe contener menos de 10% de humedad, por lo que a la salida del secado debe obtenerse una materia con una humedad ligeramente superior al 10% ya que en el proceso de molienda se pierde un 0,3% de la humedad de la materia prima y durante el proceso de pelletización, las partículas pueden llegar a perder entre el 2 y 3% de su humedad (Fredes, 2014).

c. Molienda

Dependiendo de la materia prima utilizada puede ser necesario dos etapas de triturado en un molino de martillos. En la primera se reduce el tamaño de la materia prima húmeda con un 50% de humedad hasta unos 6 mm, y en una segunda etapa se reduce el tamaño de la biomasa seca hasta un tamaño máximo de 3 mm, dependiendo del requerimiento de la prensa de pelletizado.

La importancia de la molienda en el proceso de pelletizado reside en que una adecuada trituración del material permite un alto grado de compactación y al mismo tiempo reduce la producción de finos, permitiendo la elaboración de pellets con buenas características físicas. El inconveniente de

esta etapa es su consumo energético, el cual depende directamente del tamaño final de partícula y del tipo de material a tratar (Fredes, 2014).

d. Pelletizado

Es una de las etapas principales del proceso. El aserrín proveniente de etapas anteriores ingresa a la prensa y mediante rodillos empujan el aserrín a través de agujeros (entre 5 y 25 mm) que se encuentran dispuestos en una matriz angular giratorias, disminuyendo de 3 a 5 veces el volumen del aserrín obteniendo así el producto deseado. En el proceso de compactación no es necesaria la utilización de ningún aditivo, puesto que los propios componentes lignocelulósicos actúan como aglomerante. El pellet a la salida de la prensa puede alcanzar temperaturas cercanas a 100°C y un aspecto blando por lo que deben ser enfriados para endurecerlos.

e. Enfriamiento

Al someter el producto a un enfriamiento rápido, rebajando su temperatura con aire del ambiente a contracorriente, la lignina presente en la superficie se endurece, dando forma, dureza y resistencia al pellet y así evitar su disgregación durante las etapas de manipulación posteriores: envasado y transporte, además de evaporar el agua residual.

f. Tamizado secundario

La última etapa de producción es la clasificación mediante un harnero donde se separa el material fino de los pellets, aproximadamente un 5 % del material fino que se separa en el harnero se vuelve a introducir en el proceso, siendo llevado al molino de martillos, mientras que el pellet clasificado en el harnero se lleva a la zona de acopio y/o envasado o cargado a granel directamente en los camiones de distribución (González & Pucciarelli, 2019).

g. Envasado

Finalmente, los pellets son envasados en diferentes formatos según su destino. El pellet comercializado a granel se carga directamente en camiones para su reparto o se almacena en silos para su posterior distribución. También puede ser envasado en formatos comerciales como bolsas que van entre los 14 a 20 kg, cuyo destino principal es el uso domiciliario o en instituciones, y en

maxi sacos o *big bags* de 1.000 a 1.300 kg para uso industrial. El formato a granel y maxi sacos es más conveniente por su fácil almacenamiento siendo atractivo para las industrias, por su bajo costo y manejo en el proceso de alimentación de calderas (AVEBIOM, 2014).

3.2.2 Emisiones y perfil ambiental del proceso de producción de pellets.

La generación de emisiones y residuos es habitual en procesos industriales. Cada día se emiten diferentes contaminantes al ambiente, y el proceso en estudio no es la excepción.

“El proceso de producción de las plantas de pellet, emite ciertos contaminantes que son de principal preocupación ambiental, entre ellos, el material particulado y compuesto orgánicos totales (TOC). Los quemadores del secador también emiten pequeñas cantidades de monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NOx). Los quemadores del secador también generan CO₂; sin embargo, las emisiones de CO₂ de la combustión de biomasa se consideran esencialmente neutras en carbono, siempre que la madera se aproveche de manera sostenible” (Konkin, Beauchemin & Tampier, 2010).

Para conocer y obtener las cantidades de emisiones atmosféricas que se generan en este proceso, se deben tener en consideración los factores de emisión de cada contaminante. Ocasionalmente estos factores no están disponibles para algunos procesos o para operaciones a nivel regional o local, por lo que existen factores de referencia en bases de datos como:

- a. AP-42 Compilación de factores de emisión de contaminantes atmosféricos de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (*United States Environmental Protection Agency* [US-EPA]).
- b. Guía de inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos de la Agencia Ambiental Europea (*European Environment Agency* [EEA]).
- c. Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) organismo de las Naciones Unidas para evaluar la ciencia relacionada con el cambio climático.

De acuerdo con el proceso, el secado es la etapa que genera la mayor parte de emisiones, por lo que tomaron factores de emisiones de la EPA para esta etapa y conocer datos de emisiones atmosféricas. Aunque de acuerdo con Konkin, Beauchemin, & Tampier, (2010), en el informe de

control de emisiones y contaminación del aire para la industria de fabricación de pellets de biomasa:

“Actualmente, no existen factores de emisión específicos de la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (US-EPA) o de *Environment Canada* para la producción de pellets. Para proporcionar una idea del tipo y la magnitud de las emisiones de las plantas de pellets, los factores para el secado de madera se tomaron de USEPA AP-42, Sección 10.6.1 (Tablero de fibra orientada) como la aproximación más cercana a las operaciones de pellets”.

En cuanto a los antecedentes generales encontrados en la literatura, existen varios estudios que buscan poder identificar los impactos ambientales que trae consigo el ciclo de vida del pellet. Estudios como los de Magelli et al. (2009); Adams et al. (2015); Monteleone et al. (2015); Kylili et al. (2016) y Laschi et al. (2016) han analizado los impactos mediante estudios de evaluaciones del proceso productivo. Otros evalúan los impactos en relación a etapas específicas del ciclo de vida del producto, como el transporte y disposición final, presentando la huella de carbono que deja este biocombustible (Pa et al., 2011; Sjolie & Solberg, 2011; McNamee et al., 2016) y mientras otros implementan la metodología de análisis de ciclo de vida para comprender y mejorar la gestión de producción, permitiendo la obtención de un perfil ambiental más claro de la cadena de valor del pellet.

Más en detalle, Adams et al. (2015) realizaron una comparación ambiental entre la producción de pellets convencional con y sin torrefacción, donde los resultados mostraron que los impactos en las categorías del calentamiento global y del agotamiento de recursos fósiles para los pellets torrefactos fueron menores que la de los pellets de madera sin torrefacción, presentando una mejora del 36% y 43% respectivamente en estas categorías, lo que llevó a una reducción del consumo de combustibles fósiles y de las emisiones de gases de efecto invernadero. En la categoría de impacto de formación de partículas (PMF), las etapas que presentaron impactos significativos fueron la entrega al usuario final, la granulación, la trituración y la combustión para el calor de proceso.

Laschi et al. (2016) evaluaron pellets procedentes de troncos de madera en rollo y de residuos de madera de la industria, donde las cargas ambientales más relevantes estuvieron relacionadas con el uso de la electricidad durante la fabricación de este biocombustible, en un 90% de contribución en las categorías de impacto evaluadas.

Quinteiro et al. (2019) evaluaron la producción de pellet en plantas industriales y producciones locales a pequeña escala, encontrando que la etapa de producción fue particularmente relevante para las categorías de impacto del calentamiento global, escasez de fuentes fósiles, eutrofización del agua dulce y eutrofización marina, presentando contribuciones que van del 46% al 64% del impacto total. Estos impactos resultan esencialmente del consumo de electricidad y de la combustión de los residuos de la tala relacionados con el proceso de producción de pellets.

Cabe señalar que los impactos ambientales no solo provienen del proceso productivo de pellets, sino que se considera las cargas aguas arriba de los procesos de extracción y operaciones forestales para la obtención de la materia prima. En el estudio de Salles et al. (2018) se identificaron y cuantificaron los posibles impactos ambientales derivados de la producción industrial de madera en rollizos de pino en Brasil. La etapa de aprovechamiento forestal se identificó como la principal responsable de las contribuciones a nueve categorías de impacto, donde las operaciones de cosecha y la fertilización son puntos críticos ambientales. En esta etapa las contribuciones van desde el 21% en la categoría de eutrofización de agua dulce al 76% en la formación de oxidantes. Estos resultados sugieren que tanto las necesidades de combustible fósil en las actividades de recolección como la dosis de fertilizantes deben optimizarse para disminuir el impacto ambiental.

A nivel internacional hay una gran variedad de estudios de la producción de este biocombustible con diferentes enfoques y alcances de la metodología ACV. Sin embargo, a nivel nacional no existen evidencias de ello; por lo que, es necesario poder generar estudios con este enfoque que permitan conocer los potenciales impactos que trae consigo su producción.

4. OBJETIVOS

A continuación, se dan a conocer los objetivos a cumplir en esta habilitación profesional.

4.1 Objetivo general

Realizar una evaluación ambiental de ciclo de vida de la producción de pellets de madera de pino.

4.2 Objetivos específicos

1. Comprender la metodología de evaluación de ciclo de vida y su aplicación a la industria del pellets.
2. Caracterizar los procesos productivos de pellet más representativos de la industria nacional, a través de los consumos de recursos y descarga de desechos.
3. Evaluar ambientalmente los principales procesos productivos de pellets y efectuar un análisis comparativo con otros combustibles sustitutos.

5. METODOLOGÍA

Existen impactos ambientales derivados del proceso de producción de pellets que necesitan ser cuantificados (Laschi et al., 2016). Por ello, una Evaluación de Análisis Ciclo de Vida o *Life Cycle Assessment (LCA)* permite incluir tales actividades en el estudio de impacto ambiental. A continuación, se da a conocer la metodología ACV que se implementó en el caso estudio de esta habilitación.

5.1 Análisis de Ciclo de Vida

La Norma de la Organización Internacional de Normalización (ISO) 14040/44:2006, define el Análisis de Ciclo de Vida como “un estudio que hace una recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema de producto a través de su ciclo de vida” (ISO 14040:2006). En la entrada del sistema se consideran uso de recursos y materias primas, partes y productos, transporte, electricidad, energía, etc., que se tienen en cuenta en cada proceso o fase del sistema; y a la salida, emisiones al aire, agua y suelo, así como residuos y sub-productos. Actualmente existen normas de aplicación específicas para el Análisis de Ciclo de Vida, que son:

- ❖ ISO 14040:2006. Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia. Ofrece una visión general de la práctica, aplicaciones y limitaciones del ACV en relación a un amplio rango de usuarios potenciales. En esta norma se describen los principios y el marco de referencia: definición del objetivo y el alcance, el análisis del Inventario del Ciclo de Vida (ICV), la fase de Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV), la fase de interpretación del ciclo de vida, el informe y la revisión crítica, limitaciones y la relación entre fases del ACV.
- ❖ ISO 14044:2006. Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Requisitos y directrices. Especifica los requisitos y ofrece directrices concretas para la realización de un ACV entre los que se encuentran: la definición del objetivo y alcance, el análisis del Inventario del Ciclo de Vida, la fase de Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida, la fase de interpretación del ciclo de vida, el informe final y la revisión crítica.

En un proceso se analizan todas las etapas de manera interdependiente, donde un proceso conduce al otro hasta el fin de su ciclo. Por lo que, dentro del concepto de ACV se pueden diferenciar cuatro tipos de alcances según el caso estudio (Figura 4), entre ellos podemos encontrar:

- De la cuna a la tumba: Incluye todas las entradas/salidas de los procesos que participan a lo largo de todo el ciclo de vida. En este alcance se pueden describir:
 - Materias primas: extracción de recursos.
 - Transporte de materias primas.
 - Producción: la fabricación, donde se revisan las actividades necesarias para el proceso de un material.
 - Almacenaje: almacenamiento de los productos mientras no es distribuido.
 - Distribución: transporte del producto hasta el cliente final.
 - Uso del producto: utilización del cliente o consumidor del producto.
 - Disposición, reciclaje y/o gestión final (como se devuelve al ambiente: residuo).
- De la cuna a la puerta: Se limitan las entradas y salidas desde la obtención de las materias primas hasta la salida del producto de la fábrica.
 - Materias Primas: extracción y manufactura.
 - Transporte a la planta de fabricación.
 - Producción: actividades necesarias para la obtención del producto.
- De puerta a puerta: Se consideran solo las entradas y salidas del sistema de producción.
- De cuna a cuna: Las corrientes de salida del fin del ciclo de vida pueden tener valor como materia prima o entradas para otro sistema.

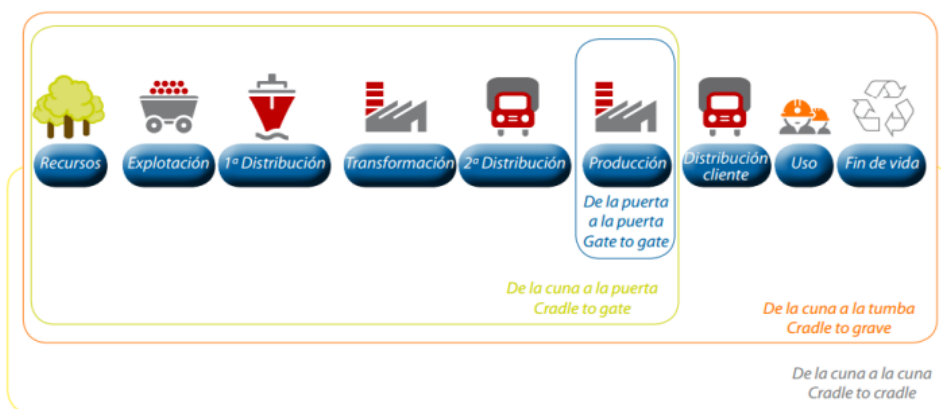


Figura 4. Alcances de ciclo de vida según alcance del ACV (ISO:14001).

De acuerdo con las normas ISO 14.040-44:2006 un análisis de ciclo de vida comprende de cuatro fases: Definición de objetivo y alcances, entrada y salida del proceso para inventario de ciclo de vida (ICV), evaluación de impacto de ciclo de vida (EICV) e interpretación del ciclo de vida. A continuación, se describen cada una de estas fases, las que serán aplicadas como la metodología del caso estudio:

5.2 Definición de objetivos y alcances

La definición del objetivo debe declarar la aplicación prevista del estudio y las razones por las que se realizó. Además, debe considerarse la audiencia a la que se le pretende comunicar los resultados del estudio y si están destinados a ser utilizados en afirmaciones comparativas destinadas a ser reveladas al público. En cuanto al alcance, éste refleja claramente la extensión del estudio, garantizando profundidad y detalle del estudio. Esto implica considerar y describir los siguientes puntos, los cuales deben ser compatibles y suficientes para abordar el objetivo establecido (ISO 14040:2006).

- a. Sistema producto a estudiar: conjunto de etapas que componen el ciclo de vida del producto o servicio a estudiar desde la perspectiva ambiental.
- b. Las funciones del sistema de producto: tiene que ver con el uso de los productos generados. La funcionalidad de los productos del sistema se expresa cuantitativamente como Unidad Funcional (UF).
- c. Unidad funcional (UF) y flujo de referencia: unidad funcional representa la unidad física comparable con otros sistemas-productos que cumplan la misma función como fin último de uso. Complementariamente, el flujo de referencia es aquella cantidad de productivo/servicio que permite realizar la equivalencia de diferentes sistemas-productos en base a una misma unidad funcional. Por ejemplo: 1 [kg] de materia prima, 1 [ton] de producto o 1 [kW] de potencia eléctrica generada.
- d. El límite del sistema: a través de él se establece el alcance del ACV. Las etapas que se van a considerar, así como los criterios a los que responde esta decisión. Asimismo, se deben identificar y justificar las entradas y salidas de proceso a considerar en el ACV.

- e. Criterios de corte: Especificación de la cantidad de flujo de material, de energía o el nivel de importancia ambiental asociado con procesos unitarios o sistema de productos para ser excluidos de un estudio.
- f. Categorías de impacto seleccionadas: se deben indicar que categorías de impacto se incluyen en el estudio de ACV, como se asignan los datos de inventario en cada impacto, cuáles son los indicadores de categorías y los modelos de caracterización.
- g. Metodología de evaluación de impacto: se establece un método para cuantificar las categorías de impacto, el que deberá ser consistente con el enfoque y objetivo del estudio del ACV.
- h. Tipos y fuentes de datos: los datos se pueden obtener de los sitios de producción asociados con los procesos unitarios dentro de los límites del sistema. Los datos pueden incluir datos medidos, calculados o estimados.
- i. Requisitos de calidad de los datos: se especifican en términos generales las características de los datos necesarios para el estudio. Se deben definir los requisitos de calidad de los datos en cuanto a:
 - Tiempo: antigüedad y periodo mínimo en el que se deberían recopilar.
 - Geografía: área geográfica a la que corresponden los datos.
 - Precisión: medida de la variabilidad de los valores para cada dato.
 - Integridad: si los datos son medidos o estimados.
 - Representatividad: evaluación cualitativa de en qué medida los datos reflejan la situación real (cobertura geográfica, periodo de tiempo y cobertura tecnológica).
 - Coherencia: evaluación cualitativa de si la metodología de estudio se aplica de manera uniforme en todo el análisis.
 - Reproducibilidad: evaluación cualitativa de si el cálculo es reproducible a partir de la documentación generada.
 - Fuente de los datos.
 - Incertidumbre de la información (datos directos, modelos, suposiciones).
- j. Supuestos y limitaciones: Las limitaciones prácticas en la recopilación de datos deben ser considerados en el alcance y documentados en el informe del estudio. Las descripciones de la calidad de los datos son importantes para comprender la confiabilidad de los resultados del estudio e interpretar el resultado del estudio.

5.3 Evaluación del inventario de ciclo de vida (ICV).

5.3.1 Recolección y cálculo de datos.

El análisis del ICV implicó la recopilación de datos y procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas relevantes de un sistema del caso estudio.

La recopilación de datos se centró en las entradas y salidas operativas (por ejemplo, el uso de combustible, electricidad, el uso de recursos y emisiones asociados), en los materiales consumidos y equipos para fabricar; construir y operar la instalación de producción de pellets de madera. La recopilación de datos abarcó informes de declaraciones de impacto ambiental de empresas productoras, entrevistas y referencias publicadas. Son varios los pasos que fueron de utilidad para asegurar la comprensión uniforme y consistente del caso estudio a analizar, los cuales incluyeron:

- Trazado del diagrama de flujo del sistema en estudio para identificar los procesos unitarios.
- La descripción de cada etapa en detalle, requiriendo conocimientos profundos acerca de cada proceso unitario del proceso. Esto involucró una descripción cualitativa y cuantitativa de las entradas y salidas necesarias para determinar donde comienza y termina el proceso, y la función del proceso unitario. Las entradas y salidas de energías fueron cuantificadas en unidades de energía.
- Los datos recopilados entregados por empresas productoras de pellets, algunos de ellos fueron producción anual y capacidad instalada de las plantas, fuentes y tipo de materia prima, distancias desde las cuales transportan la materia prima y cantidad de materia prima que ingresa a proceso, porcentajes de humedad de materia prima, consumo de agua, entre otros.
- Los datos faltantes del proceso y de las operaciones unitarias fueron recolectados de literatura publicada, junto con estudios de declaraciones de impacto ambiental de plantas productoras de la zona para acercarse más a la realidad del proceso productivo de pellet en Chile. Algunos de ellos fueron el consumo eléctrico de los equipos de las operaciones unitarias, factores de emisión de la US-EPA para el cálculo de emisiones del proceso. Además, se utilizó la base de datos Ecoinvent V3.5 para complementar los datos faltantes que no se obtuvieron de las fuentes principales.

A continuación de la recopilación de datos, se necesitan procedimientos de cálculo para la obtener los resultados de inventario del sistema definido para cada proceso unitario y para la unidad funcional definida del sistema producto.

Los procedimientos de cálculo implicaron la obtención de datos relevantes para cada elemento del inventario, se compilan en conjunto para producir el ICV de la unidad funcional. Se definió el límite del sistema estudio efectuándose balances de materia y energía de cada una de las operaciones unitarias, considerando los flujos elementales asociados a la producción. Los supuestos realizados fueron claramente declarados y justificados.

Con los balances se calcularon las entradas y salidas por etapas, considerando la unidad funcional para los cálculos. Se calcularon los flujos de materia prima (pino) que ingresa en las etapas, las pérdidas de materia seca y la pérdida de agua por las bajas de porcentaje de humedad en el producto. En la etapa de secado se realizó un balance de materia para conocer la cantidad de energía y calor necesario que se necesita para secar la materia prima que se utilizó en la producción, esto gracias al dato de consumo de combustible que se utilizó en el secador, entregado por las empresas productoras de pellet.

Además, para el cálculo de emisiones que se registran en el proceso, se realizó una búsqueda en la literatura de factores de emisión de los equipos que se asemejan a los del proceso en estudio para obtener las emisiones de éste.

5.3.2 Entradas y salidas de proceso.

En esta etapa se dan a conocer las entradas y salidas de proceso del límite del sistema en estudio como se referencia en la Figura 5. En el caso estudio se consideraron datos de producción del proceso en forma global como caja negra entrada/salida, considerando el transporte y producción de materia prima. También se consideraron datos de las etapas que conforman el proceso productivo del pellet (caja negra por etapa) para luego ser comparadas entre ellas.

Fue necesario validar los datos recolectados con la realización de balances de materia y energía en función a la unidad funcional establecida en el estudio. Además, se dan a conocer datos de recursos (materias primas y energía), los cálculos de emisiones de la etapa de secado y la generación de residuos a la salida de éste, los que se describen a continuación:

- Cantidad de aserrín húmedo de pino radiata que entra al proceso.

- Cantidad de combustible que ingresa al secador.
- Consumo de electricidad, agua, combustibles.
- Pérdida de materia prima seca en las etapas de tamizado y molienda.
- Pérdida de agua, baja de porcentajes de humedad en etapas de secado, molienda y pelletizado.
- Cantidad de producto obtenido en la etapa de harneo.
- Factores de emisión para el cálculo de emisiones atmosféricas. La estimación de emisiones del contaminante que se genera consiste en la cantidad de combustible consumido que ingresa al secador rotatorio y el factor de emisión seleccionado (asociado al tipo de combustible), para cada contaminante como material particulado, CO, NOx, SOx. Los factores de emisiones involucrados para el cálculo de emisiones que genera el proceso fueron obtenidos de la US-EPA (*United States Environmental Protection Agency*) para las etapas del proceso, considerando valores de factores que mejor se asemejan al caso estudio.

Luego estos datos son introducidos en un programa computacional para el análisis y comparación de las entradas/salidas del proceso. En este estudio se utilizó el software SimaPro 9 donde se empleó un método de evaluación para cuantificar las categorías de impacto del proceso.

Todos estos datos de entrada y salida que ingresan al software son relacionados con la unidad funcional establecida en el alcance del caso estudio. Los datos obtenidos en esta fase son el punto de partida para la evaluación de ciclo de vida (ISO 14044:2006).

La documentación de los procedimientos de cálculo puede ser revisados en el anexo B y C del presente informe.

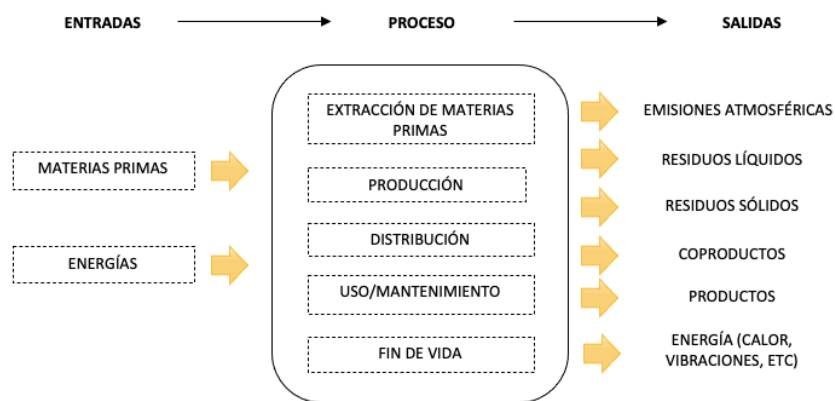


Figura 5. Entrada/salida de proceso de un sistema (Yuste, 2014).

5.4 Evaluación de impacto de ciclo de vida (EICV).

En esta fase se seleccionan y determinan las categorías de impacto que se consideran en el estudio, para posteriormente, evaluar la importancia de los potenciales impactos ambientales utilizando los resultados del inventario del ciclo de vida (ICV). Para obtener resultados se debe seleccionar un método de impacto ambiental. Si bien, existen diversos métodos para la evaluación de impactos del ciclo de vida, la elección del método debe tener relación con el objetivo y el alcance establecido, y con cada potencial impacto ambiental del proceso que se espera evaluar.

Las etapas de la evaluación de impacto de ciclo de vida son las siguientes:

- **Clasificación:** consiste en agrupar las cargas ambientales debido al consumo y a la generación de emisiones y residuos, en función de los potenciales efectos ambientales que produce cada una de ellas (esto se hace en el inventario de ciclo de ciclo de vida).
- **Caracterización:** cálculo de la contribución potencial de cada compuesto detectado en el análisis de inventario a un efecto ambiental. Esto se realiza mediante los factores de caracterización, donde las diferentes intervenciones ambientales se convierten a unidades del indicador (ISO 14044:2006).
- **Normalización:** Es el cálculo de la magnitud de los resultados del indicador de categoría en relación con la información de referencia. Se puede entender mejor la magnitud relativa para cada resultado del indicador del sistema estudio y permite la comparación entre categorías de impacto.

En estas dos últimas etapas de caracterización y normalización se pueden utilizar distintos métodos para la evaluación de impacto de ciclo de vida. El uso de determinado método dependerá del nivel de información requerido y para qué se quiere utilizar el ACV (a nivel interno, externo, para comparar productos, etc.). Algunos métodos pretenden definir un perfil ambiental cuantificando los efectos intermedios “*midpoints*” que presentan las diferentes categorías de impacto, otros, tratan de analizar los efectos finales “*endpoints*” en el medioambiente y la salud de las personas.

La selección de las categorías de impacto debe reflejar un conjunto extenso de aspectos ambientales. La identificación de los resultados de ICV adecuados que se pueden asignar a la categoría de impacto, teniendo en cuenta el indicador de categoría elegido y los puntos de categoría final identificados. Se denomina un indicador de categoría a una representación cuantitativa de cada categoría de impacto (ISO 14044:2006). Todo esto se ve representado en la Figura 6.

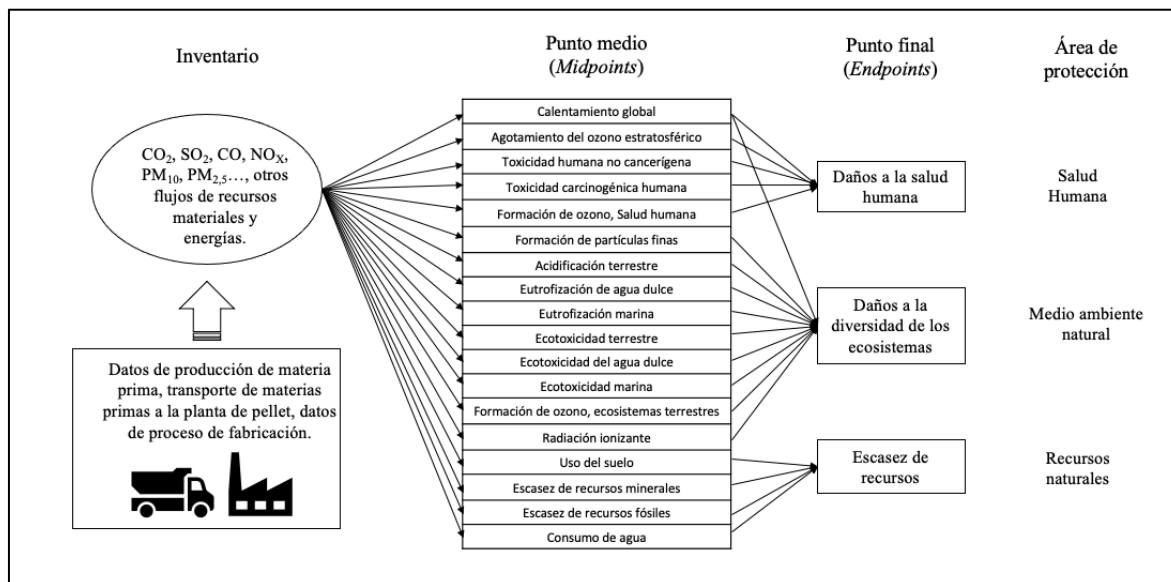


Figura 6. Mecanismo ambiental: relación entre inventario, impactos de efecto intermedios “midpoint”, impactos de efecto final “endpoint” y áreas de protección (elaboración propia).

Para el caso estudio se empleó el método “ReCiPe 2016 *Midpoint* V1.1 perspectiva H” (Jerárquico) para análisis y comparación. Donde *Midpoint* hace relación a un eslabón que genera un efecto de causa – efecto. Las categorías de impacto ambiental intermedias se hallan más cercanas a la intervención ambiental, permitiendo, en general, modelos de cálculos que se ajustan mejor a dicha intervención. Proporcionan información más detallada de qué manera y en qué punto se afecta el medio ambiente. Además, se toma en cuenta una perspectiva jerárquica (H), está asume que la mejor herramienta a los daños ambientales es la gestión adecuada (Golsteijn, 2012). Además, este método ha sido ampliamente utilizado para evaluar los impactos ambientales de la producción de pellets (por ejemplo, en estudios de Quinteiro et al., 2020; Hamedani et al., 2019; Laschi et al., 2016).

Este método entrega resultados de 18 categorías de impacto, pero en este informe no todas las categorías son descritas, por lo que se realizó una selección. Se eligió la categoría de calentamiento global (CG) por su relevancia en un contexto de cambio climático. Además, se tuvo en cuenta otras categorías de impacto para proporcionar una evaluación medioambiental completa y coherente con conclusiones sólidas. Por lo tanto, se eligieron las restantes categorías de impacto porque son comúnmente reportadas en los ACV de los sistemas de producción de pellets y son las que mayormente representan los potenciales impactos en relación a las fuentes de energías

involucradas. Las categorías de impacto mencionadas se presentan en la Tabla 2 junto con su respectivo indicador.

Tabla 2. Categorías e indicadores de impacto utilizados en el estudio.

Categoría de impacto	Indicador de impacto
Calentamiento Global (CG)	kg de CO ₂ eq.
Agotamiento del Ozono (AO)	kg de CFC11 eq.
Formación de partículas finas (FPF)	kg de PM _{2,5} eq.
Acidificación Terrestre (AT)	kg de SO ₂ eq.
Eutrofización de agua dulce (EAD)	kg de P eq.
Eutrofización marina (EM)	kg de N eq.
Escasez de recursos fósiles (EF)	kg de oil eq.

El método ReCiPe 2016 *Midpoint* V1.1. (H) empleado entrega resultados de la caracterización y normalización de estas categorías de impacto. Por lo que se añade la evaluación de la normalización de las categorías de impacto al estudio, la cual es una técnica que permitió comparar la relevancia del impacto entre las categorías seleccionadas. La tabla de datos de factores de normalización del método es presentada en el anexo D del informe.

5.5 Interpretación de la evaluación de impacto de ciclo de vida

Los resultados obtenidos están relacionados con la unidad funcional establecida en el alcance. Se representan mediante gráficos y en el siguiente orden:

- En primer lugar, se presentaron los resultados del análisis de proceso global el cual incluye las evaluaciones de caracterización y normalización. El proceso global consideró cinco subsistemas: materia prima (producción), infraestructura (fábrica de pellets), transporte (materia prima), consumo de electricidad (producción de pellet) y calor (de combustión). Se describieron y analizaron las categorías seleccionadas en relación a los potenciales impactos ambientales que arrojó el inventario del proceso con sus respectivas graficas de impacto.
- En segundo lugar, se dieron a conocer las comparaciones de las etapas que conforman el proceso incluyendo el transporte de la materia prima a la planta. La caracterización de las

categorías de impacto que más influyeron en ellas y una comparación de la magnitud de éstas en relación al análisis de normalización obtenido del método empleado.

- Para terminar, se realizó una comparación de los resultados de la producción de pellets de madera con otras producciones de combustibles tradicionales.

De estos resultados se identificaron los puntos críticos y los potenciales impactos que emite el proceso. Además, se dan a conocer las limitaciones del estudio y se proporcionan recomendaciones.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se describen y explican los resultados obtenidos de la evaluación de ciclo de vida de la producción de pellets en Chile.

6.1 Objetivos y alcance de este estudio

Evaluar ambientalmente y con enfoque de ciclo de vida de la producción nacional de pellets de madera de pino radiata mediante un caso estudio en la Región de la Araucanía. Lo anterior, con el propósito de cuantificar en primera instancia los potenciales impactos ambientales asociados a la fabricación de este biocombustible con una perspectiva de la cuna a la puerta.

En cuanto al alcance, para conseguir lo anterior se definieron los siguientes aspectos:

6.1.1 Sistema-producto de caso estudio

Para el caso en estudio se consideró:

Cobertura geográfica: el estudio abarcó el área geográfica de la Región de la Araucanía.

De acuerdo con el Anuario Forestal 2020, esta región junto con la Región del Biobío son zonas forestales donde se concentran la mayores superficies de plantaciones de pino radiata (materia prima que utiliza el proceso), donde la Octava Región concentra el 58,9% y la Región de la Araucanía el 19,4% de la superficie total plantada. Si bien la Octava Región concentra las principales plantas productoras de pellets, se abarcó el área de la Región de la Araucanía debido a que los datos primarios obtenidos fueron de una planta de esta zona.

Cobertura tecnológica: se basó en una planta de pellets convencional, que utiliza como materia prima aserrín húmedo compuesto 100% de pino radiata, proveniente principalmente de un aserradero propio ubicada al lado de la planta y, en menor medida, de aserraderos de terceros ubicados en un radio menor a 100 km. Se consideró una etapa de secado en el proceso, el cual utiliza como combustible biomasa seca (aserrín seco obtenido del aserrín húmedo que entra a la producción), considerando una producción de la planta de 15 mil toneladas al año. Para más detalles del proceso, se puede encontrar en la sección 3.2.1 de la revisión bibliográfica.

Cobertura temporal: los datos de proceso datan del año 2020 y se obtuvieron en entrevista con empresas productoras. También, se consideraron datos de las Declaraciones de Impacto Ambiental (DIA) del proceso que datan del año 2006 y 2019.

Función del sistema: Elaboración de pellets de madera proveniente de plantaciones forestales (biocombustible), como fuente de generación de energía calórica y eléctrica.

Unidad funcional: La unidad funcional del estudio consistió en la fabricación de 1 kg de pellets de madera de pino radiata a granel con menos de 10% de contenido de humedad.

Criterio de corte: en cuanto a la cantidad de flujo de material y energías, se consideró un 98% de los insumos en masa al proceso productivo, y el resto en insumos de energías.

6.1.2 Límites del sistema

De acuerdo con la información que se manejó se definieron los límites del sistema y se estableció un alcance de la cuna a la puerta del ACV de la producción de pellet. A continuación, en la Figura 7 se destacan las etapas escogidas del ciclo de vida para el límite del sistema.

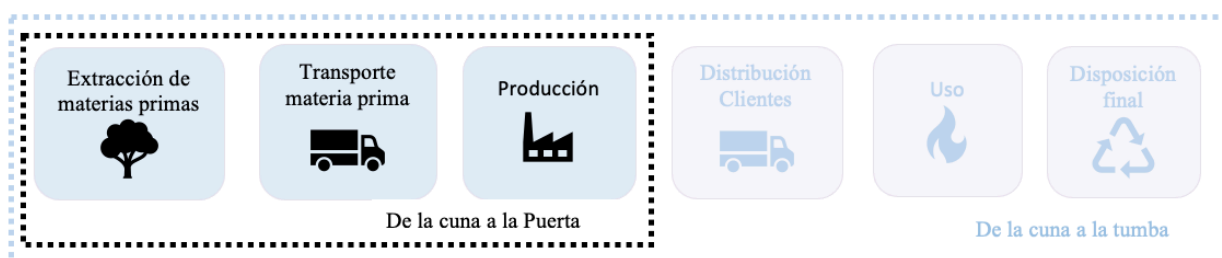


Figura 7. Etapas de ciclo de vida incluidas en los límites de sistema del ACV del caso estudio.

El límite del sistema en estudio se enfocó en obtención de materia prima, transporte y la fabricación de pellet, el cual queda representado en detalle en la Figura 8. Es relevante destacar que los residuos líquidos quedan fuera de este estudio, ya que son tratados en la planta de tratamiento, son utilizados en riego o eliminados a la atmósfera como vapor de agua, al igual que los residuos sólidos domiciliarios que produce la empresa.

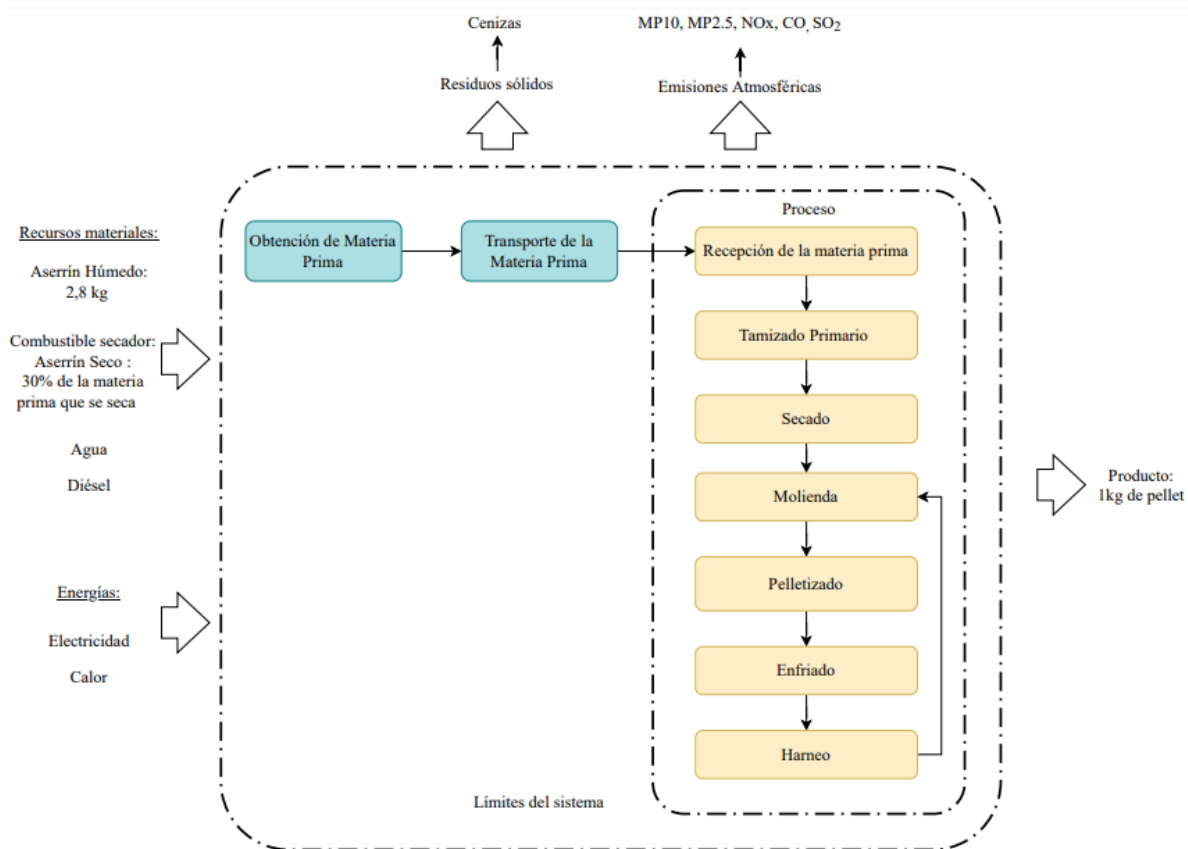


Figura 8. Límites del sistema del caso estudio (elaboración propia).

Como se mencionó anteriormente se eligió el método ReCiPe 2016 *Midpoint* V1.1 (H). Los datos de factores normalización y los indicadores de las categorías de impacto del método son presentados en el anexo D del informe. La selección de los indicadores de punto medio reportados en este informe se basó en la pertinencia de éstos como descriptores del proceso. De esta manera, sólo se reportarán los 7 indicadores que describen de mejor forma los potenciales impactos de este proceso productivo. Para más detalles de la elección de método revisar la sección 5.4 de metodología.

6.1.3 Tipo de fuente y requisitos de calidad de datos

En cuanto a los datos considerados en el desarrollo del inventario, se obtuvieron:

- En primera instancia mediante entrevistas a empresas productoras de pellets de la Región del Biobío y de la Araucanía desde noviembre del 2020 hasta febrero 2021.

- Los datos medidos y entregados por empresas fueron: producción anual, capacidad instalada anual de producción, cantidad de materia prima que ingresa al proceso, humedad de materia prima y del producto final, consumo de agua, cantidad de combustible necesaria para el secado de la materia prima. Los datos fueron entregados por empresas productoras de pellets de las áreas geográficas en estudio.
- Para completar datos faltantes del estudio, se tuvo en consideración información de Declaración de Impacto Ambiental de plantas de pellets en Chile obtenidos del Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) y de literatura relacionada con la industria del pellet, teniendo en consideración una antigüedad inferior a 7 años. Además, se utilizó la base de datos de Ecoinvent para complementar la información, la cual está incorporada en el software SimaPro 9. Se estimó consumo de energía, calor, electricidad del proceso, emisiones del proceso. Los datos se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Datos primarios y secundarios considerados en el caso estudio.

Datos primarios: Entrevista a empresas y de declaraciones de impacto ambiental	
Materia prima: cantidad de aserrín húmedo, densidad y humedad	Dato obtenido de empresas productoras.
Combustible del secador: cantidad y porcentaje de humedad aserrín	Dato obtenido de empresas productoras.
Agua	Dato obtenido de empresas productoras y de referencias de DIA.
Electricidad	Datos obtenidos de literatura del proceso de producción convencional.
Calor/ energía	Datos obtenidos mediante cálculos. Ver anexo B del informe.
Emisiones del proceso	Datos obtenidos mediante cálculos y factores de literatura. Ver anexo B del informe.
Datos secundarios: base de datos Ecoinvent	
Diésel	Diésel bajo en azufre {RoW} mercado para APOS, U
Carga útil del camión 27 t	Transporte, flete, camión > 32 toneladas métricas, EURO4 {RoW} transporte, flete, camión > 32 toneladas métricas, EURO4 APOS, U
Astillas de madera húmedas	Astillas de madera, húmedas, medidas como masa seca {RoW} producción de astillas de madera blanda en aserradero APOS, U
Aceite lubricante para maquinarias	Aceite lubricante {RoW} mercado de aceites lubricantes APOS, U

Astilladora	Astilladora estacionaria eléctrica {GLO} mercado para APOS, U
Fabricación de pellets de madera	Fabricación de pellets de madera, infraestructura / RER / IU
Electricidad	Electricidad de media tensión {CL} transformación de tensión eléctrica de alta a media tensión APOS, U
Energía/calor	Calefacción urbana o industrial, distinta del gas natural {CL} cogeneración de calor y energía, astillas de madera, 6667 kW APOS, U

6.1.4 Supuestos y limitaciones

Al contar con información reducida de algunas etapas del ciclo de vida se asumieron las siguientes limitaciones y suposiciones:

- Se estableció un alcance puerta a puerta del estudio ACV. Las etapas de extracción de la materia prima y las etapas relacionadas con lo que sucede a la salida de la planta como transporte, distribución, uso y disposición final no se incluyó en el presente estudio, debido a que la obtención de estos datos para realizar un análisis de la cuna a la tumba no fue posible obtenerla de empresas o DIA. De esta manera, queda como desafío posterior la ampliación de los límites del sistema en la medida que se cuenten con datos de mejor calidad.
- Por ausencia de datos para la realidad nacional se asumió el proceso productivo de aserrín de pino desde la base de datos internacional de Ecoinvent V3.5.
- Para los datos de producción, si bien son obtenidos mediante entrevista a empresas, éstos se complementaron con literatura y estudios relacionados, incluyendo la base de datos de Ecoinvent. Los cálculos de las emisiones se realizaron en base a los datos obtenidos del inventario en relación a los factores de emisiones de la US-EPA. Actualmente, no existen factores de emisión específicos de la US-EPA para la producción de pellets, sin embargo, se consideró que los factores para el secado de madera podrían ser una aproximación cercana a las operaciones de pellets: US-EPA AP-42, Sección 10.6.1 (Tablero de fibra orientada).
- Para el transporte, de acuerdo con el Decreto 94/1991 establecido por el Ministerio de transporte y telecomunicaciones de Chile, establece condiciones para el transporte de productos forestales: “El transporte de chips, astillas, aserrín y despuntes deberá efectuarse

de modo que se impida totalmente el escurrimiento al suelo del producto transportado o su dispersión al aire, por lo que los vehículos deberán ser herméticos o contar con una carpa o mallas adecuadas, convenientemente sujetas a la carrocería del vehículo”. Esto implica que, de acuerdo con la información entregada por una de las empresas productoras, se utilizó un tipo de camiones con piso flotante (semirremolque), que representan las actividades normales de entrada de insumos a la planta, en función de las distancias de viaje. Este camión tiene una capacidad de carga de 35 toneladas, una carga útil de 27 toneladas para el transporte de la biomasa forestal a las plantas de producción de pellet, considerando distancias desde 0,5 km que corresponden a aserraderos propios de la empresa y distancias de un radio de 100 km para la obtención de la materia prima a terceros.

- En cuanto a las energías involucradas, la electricidad requerida es contratada y suministrada desde el Sistema eléctrico Interconectado Central (SIC), donde los mayores consumos en kWh son para etapas como molienda, pelletización y en procesos relacionados con movimiento de material, monitoreo, control de proceso y envasado. El calor requerido en el secador para reducir el contenido de humedad en la materia prima de 45% en invierno a 10 %, se obtiene mediante la combustión aserrín seco (30% del total del aserrín seco que sale de la etapa de secador) en el horno.
- Los tiempos de producción fueron 336 días al año, sin contar los días de mantenimiento de equipos, entre otras actividades. Con 28 días de producción al mes y dos turnos de 8 horas al día.

6.2 Inventario de ciclo de vida

6.2.1 Obtención de datos de entradas/salidas de proceso

Este punto comprende la cuantificación e identificación de los recursos utilizados en el estudio. Para ello se realizaron balances de materia que permiten verificar la consistencia de las entradas/salidas consecutivas del proceso productivo.

A continuación, se presenta en la Tabla 4 resumen de las entradas/salidas de las operaciones unitarias del proceso considerando los límites del sistema.

Tabla 4. Resumen general de las entradas y salidas de la tecnosfera de operaciones unitarias del proceso relacionada con unidad funcional de 1kg de pellets.

Etapas del proceso	Recepción materia prima	Tamizado primario	Secado	Molienda	Pelletizado	Enfriamiento	Harneo
Unidad funcional 1 kg de pellet de madera de pino radiata							
Entrada madera (kg)	2,8	2,8	2,77	1,18	1,17	1,13	1,13
Salida madera (kg)	2,8	2,77	1,18	1,17	1,13	1,13	1,07
Combustible aserrín (kg)	–	–	0,51	–	–	–	–
Pérdida masa (kg)	–	0,03	–	–	–	–	0,06
Pérdida de agua (kg)	–	–	1,08	0,004	0,04	–	–
Electricidad (kWh)	–	0,01	0,03	0,4	0,92	0,01	0,01
Energía (MJ)	–	–	8,42	–	–	–	–
Calor (MJ)	–	–	0,79	–	–	–	–
Emisiones							
MP (kg)	–	–	0,0011	–	–	–	–
MP ₁₀ (kg)	–	–	0,0006	–	–	–	–
CO (kg)	–	–	0,0014	–	–	–	–
NO _x (kg)	–	–	0,0002	–	–	–	–
Ceniza (kg)	–	–	0,0102	–	–	–	–

En la Tabla 4 se presenta el resumen de las entradas y salidas de proceso global y se reportan las cargas globales de los principales recursos naturales, descargas al aire y al agua asociados al caso de estudio. Las pérdidas de masa que aparecen dentro del proceso de fabricación se deben principalmente a la etapa de tamizado primario donde se eliminan elementos extraños que pueda contener la materia prima que llega a la planta y en la etapa de harneo donde se obtiene un 5% de material fino de las cribas.

Se puede observar que dentro del proceso se ocupan dos tipos de fuentes de energía; eléctrica y calórica. La energía eléctrica presente en las etapas de proceso proviene principalmente de fuentes de combustibles fósiles, y de acuerdo con los datos de la tabla 4, se presentan mayores consumos en las etapas de secado, molienda y pelletizado. Por lo que, se espera que las cargas ambientales del proceso se verán reflejadas principalmente en estas etapas. Poder implementar o utilizar energías limpias y renovables para las maquinarias del proceso reduciría los impactos y evitaría utilizar electricidad desde la red SIC.

En cuanto a la energía calórica presente en la etapa de secado, ésta se obtuvo de la combustión de biomasa forestal y es utilizada en el secado de la materia prima. Además, emite emisiones a la atmósfera que, si bien son dañinas para el medio ambiente y la población, sus cargas son menores por ser una energía renovable en lugar de combustibles fósiles convencionales.

Cabe señalar que las demás tablas del resumen de transporte junto con los cálculos detallados de balances de materia y energía se pueden encontrar en los anexos B y C del informe.

6.2.2 Inventario de ciclo de vida global

Mediante el uso del software SimaPro 9, se ingresaron los parámetros del proceso y fue posible complementar con los procesos desde bases de datos internacionales, para modelar el proceso en estudio. A continuación, en la Tabla 5 se presenta el inventario de ciclo de vida del proceso global, señalando las entradas y las salidas obtenidas del análisis del programa.

Tabla 5. Resumen general de las entradas y salidas de la tecnosfera del proceso relacionada con unidad funcional de 1kg de pellets.

Entradas desde la tecnosfera	Cantidad	Descripción
Unidad funcional 1 kg de pellets de madera de pino radiata		
Aserrín húmedo	2,8 kg	45% de humedad promedio
Electricidad	1,38 kWh	Consumo de electricidad diario/producción diaria
Combustible secador	0,51 kg	Aserrín seco del proceso a 10% de humedad
Energía	8,42 MJ	Combustión de 0,51 kg de aserrín seco en el horno por el poder calorífico de combustible.
Agua	3x10 ⁻⁵ m ³	Abastecimiento de pozo profundo
Calor	0,78 MJ	Calor necesario para secar la materia prima
Transporte	0,27 tkm	Toneladas de materia prima x distancia
Emisiones al ambiente	Cantidad	Descripción
Material particulado	0,0011 kg	Emisión aire: factor de emisión de la EPA x Cant. combustible
Material particulado 10	0,0006 kg	Emisión aire: factor de emisión de la EPA x Cant. combustible
Monóxido de carbono	0,0014 kg	Emisión aire: factor de emisión de la EPA x Cant. combustible
Óxido de nitrógeno	0,0002 kg	Emisión aire: factor de emisión de la EPA x Cant. combustible
Ceniza	0,0102 kg	2% del 30% que de la materia prima que entra al secador
Carga Global: inventario de ciclo de vida		
Dióxido de carbono	0,94 kg	Aire : Obtenida del inventario del Software SimaPro 9
Óxidos de Azufre	1,03x10 ⁻⁷ kg	Aire : Obtenida del inventario del Software SimaPro 9

COV	7×10^{-10} kg	Aire : Obtenida del inventario del Software SimaPro 9
Agua	23,1 kg	Agua: Obtenida del inventario del software SimaPro 9
Fósforo	$1,1 \times 10^{-7}$ kg	Agua: Obtenida del inventario del software SimaPro 9
Nitrato	$5,5 \times 10^{-4}$ kg	Agua: Obtenida del inventario del software SimaPro 9
Nitrito	$7,3 \times 10^{-8}$ kg	Agua: Obtenida del inventario del software SimaPro 9
Petróleo Crudo	0,065 kg	Crudo: obtenido del inventario del software SimaPro 9
Carbón	0,35 kg	Crudo: obtenido del inventario del software SimaPro 9
Cobre	$9,45 \times 10^{-7}$ kg	Crudo: obtenido del inventario del software SimaPro 9

De los consumos de energía presentes en el proceso, el consumo de la electricidad tiene principal vinculación con gran parte de las cargas ambientales obtenidas del perfil. Ésta arrastra varias cargas aguas arriba, debido a la procedencia de esta energía (mix energético de la matriz primaria), por lo que del análisis completo del proceso se obtienen perfiles de consumo de carbón, petróleo crudo, y emisiones al aire de COV y CO₂. Además, el transporte presente contribuye a estas cargas debido al consumo y combustión de combustible diésel utilizado.

En la etapa de secado, el combustible de residuos forestales trae consigo bajas cargas ambientales, sin embargo, ésta representa una emisión directa por la quema de biomasa, la cual involucra la emisión de contaminantes al aire como material particulado, NO_x y cenizas. Es importante mencionar que la cantidad de cenizas que se generan corresponden al 2% de la biomasa que se quema para fines de secado (30% de la materia prima total que ingresa al sistema).

Si bien, en el análisis general del proceso quedan fuera los residuos líquidos, en la Tabla 5 se observan cargas de agua presentes en el inventario. Esto puede estar vinculado con la electricidad, ya que proviene de un mix energético donde la hidroelectricidad representa un 6,3% de la matriz (Deloitte, 2016).

Los datos considerados desde base de datos Ecoinvent V3.5 se pueden encontrar en la Tabla 3 de la sección 6.1.3 del estudio.

6.3 Evaluación e interpretación de impacto de ciclo de vida en el caso estudio

Se obtuvieron resultados de caracterización y normalización de las categorías de impacto. A continuación, en la Tabla 6 se observan los resultados totales de las categorías en estudio del proceso global.

Tabla 6. Resultados de las categorías de impacto relevantes en el proceso global.

Categoría de impacto	Total	Indicador (/kg pellets)
Calentamiento Global (CG)	1,04	kg CO ₂ eq
Agotamiento del ozono estratosférico (AO)	5,90E-07	kg CFC-11 eq
Formación de partículas finas (FPF)	0,011	kg PM2.5 eq
Acidificación terrestre (AT)	0,006	kg SO ₂ eq
Eutrofización de agua dulce (EAD)	0,001	kg P eq
Eutrofización marina (EM)	3,80E-05	kg N eq
Escasez de recursos fósiles (EF)	0,28	kg oil eq

En el Gráfico 1 se observa el aporte de cada subsistema del proceso en relación a la caracterización de categorías de impacto. Los resultados en detalle se encuentran en el anexo C del informe.

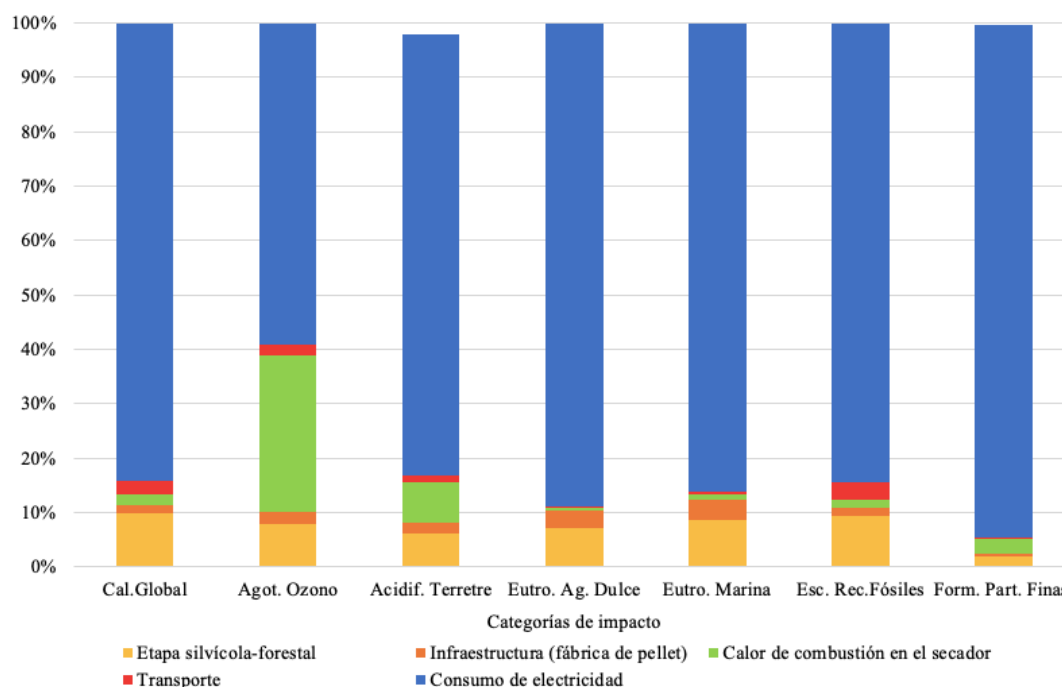


Gráfico 1. Caracterización de categorías de impacto más relevantes del proceso global.

De los resultados obtenidos el uso de consumo de electricidad en la producción de pellets es la actividad que mayor contribuye al impacto en las categorías evaluadas, siendo el punto más crítico en el perfil medioambiental, donde su contribución varía entre 59,1% y 94,2% del total según la categoría. Este gran consumo de energía está presente en las etapas más relevantes del proceso que requieren electricidad como operaciones accionadas por motores eléctricos; molienda, secado, pelletizado y en todas las máquinas utilizadas en el movimiento de materiales, el control, la climatización y la iluminación (Magelli et al., 2009). De acuerdo con Laschi et al. (2016) las

contribuciones de este punto crítico se deben principalmente al mix energético, donde la principal fuente de energía depende de la base no renovable de la red de electricidad del país, lo que deriva en diversas cargas ambientales negativas de emisiones al aire y suelo (Hernández & Díaz-Jiménez, 2021), viéndose reflejado principalmente en las categorías como calentamiento global, escasez de recursos fósiles y formación de partículas finas (Adams et al., 2015).

La energía calórica presente en el proceso se consume en el secado del aserrín húmedo que ingresa al proceso; y la combustión de esa biomasa es la que produce la carga asociada a ese tipo de combustible renovable, principalmente presente en la categoría de agotamiento del ozono estratosférico con un 28,9%.

Una manera de poder reducir las cargas ambientales de las dos fuentes de energía presentes en el proceso es aplicando la cogeneración. Ésta produce simultáneamente energía eléctrica y energía térmica para el secado de los residuos de madera, reduciendo el consumo de energía y de emisiones de gases de efecto invernadero (Orellana, 2013).

En lo que respecta a las operaciones etapa silvícola forestal, ésta contribuyó con alrededor de 6% a 10% en las categorías en estudio. Los datos de producción fueron obtenidos de la base de datos de Ecoinvent y sus impactos derivan de las operaciones de tala y de astillado, donde se obtiene el aserrín húmedo antes del eventual secado y cepillado de la madera (Quinteiro et al., 2020). En cuanto al transporte, la contribución a las categorías en estudio varió entre 0,3% a 3,3%, donde las mayores contribuciones se presentaron en las categorías de calentamiento global, agotamiento del ozono y escasez de recursos fósiles, debido al uso de diésel en maquinarias y transporte de materia prima (Quinteiro et al., 2020). Al igual que Pergola et al. (2017) las contribuciones de operaciones de producción de materia prima y transporte produjeron una menor contribución al perfil ambiental, variando entre 2% y el 10% para las categorías de impacto ambiental evaluadas.

A continuación, se describieron en detalle las categorías y las sustancias principales de mayor impacto en cada una.

6.3.1 Calentamiento global (CG)

El principal contribuyente a esta categoría de impacto es la producción de pellets por su requerimiento de electricidad, el cual equivale al 84,2%, o sea a 0,84 kg de CO₂ de 1kg total de esta categoría. De acuerdo, y al igual que Quinteiro et al. (2020), el uso de electricidad es uno de los factores principales que contribuye en esta categoría de impacto con más del 90% en la producción. Debido a que la fuente de electricidad de la cual se alimenta el proceso proviene del

mix de fuentes de energía presente en la matriz energética chilena (año 2018), destacando por sobre todos los combustibles fósiles convencionales. Además, esta categoría contribuyó con emisiones de CH₄ debido a la combustión de residuos de madera asociados a la generación de calor para el secado del aserrín durante el proceso de producción de pellets. Por otra parte, el transporte aportó con un 2,5% y la obtención de materia prima con un 9,8% al perfil ambiental, resultados similares a los obtenidos en el estudio de Laschi et al. (2016), donde estas etapas aportaron menos del 10% del impacto en el perfil.

Cabe señalar que del ACV, la sustancia con mayor impacto es el dióxido de carbono correspondiendo 95% seguido de metano con un 3,8%.

6.3.2 Agotamiento del ozono (AO)

Las emisiones de esta categoría se informan en términos de triclorofluorometano (kg CFC-11 eq), y del mismo modo que la categoría anterior, el mayor impacto se debe al consumo de electricidad representando el 59,1 % equivalente a $3,5 \times 10^{-7}$ kg CFC-11. A esta categoría contribuyó la combustión requerida para el secado de aserrín con un 28,9% del total, equivalente a $1,71 \times 10^{-7}$ kg CFC-11, debido a los gases que emite la combustión (Laschi et al., 2016). En cuanto de producción del aserrín, el impacto de esta categoría está asociado al astillado y la extracción de madera (Peric et al., 2020).

6.3.3 Formación de partículas finas (FPF)

La electricidad fue la responsable de un 94,2% de impacto total. Partículas < 2,5 µm representaron el 80,1% equivalente a 0,009 kg PM_{2,5} en esta categoría. De acuerdo con Adams et al. (2015) la principal fuente de partículas es el consumo de energía en la combustión en la etapa de secado, pelletizado y el uso de combustible fósiles en las operaciones de recolección y astillado en la obtención de la materia prima.

6.3.4 Acidificación terrestre (AT)

Las emisiones de dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno hacen que esta categoría equivalga a un impacto de 0,006 kg de SO₂. En esta categoría, al igual que en las anteriores, la generación de electricidad es la responsable del 81,2% equivalente a $4,6 \times 10^{-3}$ kg de SO₂ del impacto, donde de acuerdo con Kylili et al. (2016) las etapas de secado, molienda y pelletización son las que más contribuyen. Otro factor relevante es la generación de calor con un 7,8% equivalente a 0,000423 kg de SO₂.

Las sustancias que más influyeron fueron los óxidos de nitrógeno y el dióxido de azufre con un 30% y 60%, respectivamente. Estos contaminantes que permanecen en la atmósfera, de acuerdo con Magelli et al. (2009), también son producidos por la combustión de combustibles fósiles del transporte y de maquinarias de la etapa de producción de materia prima, refrendados por lo presentado en este estudio.

6.3.5 Eutrofización de agua dulce (EAD) y marina (EM)

La eutrofización de agua dulce deriva principalmente del consumo de electricidad durante la fase de producción de pellets, alcanzando una emisión equivalente de $5,3 \times 10^{-4}$ kg de P (88,9%). La producción de materia prima y el transporte representaron el 7,1 % y un 0,3%, respectivamente. La primera muy relacionada a las operaciones forestales donde utilizan fertilizante a base de fósforo (Quinteiro et al., 2019).

Mientras que los impactos para la eutrofización marina resultan principalmente de los nitratos emitidos al agua durante la generación de electricidad, la cual emitió un $3,3 \times 10^{-5}$ kg de N equivalente, responsable del 86,3%. Las etapas de transporte y producción de materia prima representaron un 0,41% y 8,6% respectivamente. La sustancia que mayor responsabilidad tiene según el análisis es el nitrato con un 97,4% del total de esta categoría donde el uso de fertilizante nitrogenado en la fase forestal aporta significativamente al perfil ambiental (Quinteiro et al., 2019).

6.3.6 Escasez de recursos Fósiles (EF)

Esta categoría está relacionada principalmente con el uso de los combustibles fósiles. La electricidad como se ha mencionado anteriormente es la emisión que más contribuyó en el proceso y en esta categoría no es la excepción, representando un 84,4% del impacto debido al consumo de energía proveniente de combustibles fósiles convencionales. Los otros procesos involucrados como la producción de materia prima y transporte consumieron un 9,4% y 3,3%, respectivamente. Las otras contribuciones como la infraestructura contribuyeron con un consumo muy bajo alrededor del 1,6% del total de la categoría.

Del inventario de esta categoría, los combustibles con mayor contribución asociados a la generación de electricidad fueron petróleo crudo con una contribución del 23,2%, carbón crudo con un 53,6% y gas natural un 21,8%.

6.3.7 Comparación de impactos por etapas de proceso

De acuerdo con lo mencionado anteriormente en la Tabla 4 y de los resultados de comparación de las distintas etapas del proceso, se puede observar en el Gráfico 2 que las etapas con mayor participación en las categorías de ecotoxicidad terrestre y calentamiento global fueron el secado, molienda y pelletizado, debido al consumo de las dos fuentes de energías involucradas (eléctrica y calórica). Los datos se muestran en el Gráfico 2, donde se destacan las tres etapas de mayor contribución. En cuanto a ecotoxicidad terrestre, la molienda presenta un 0,94 kg de 1,4-DCB, pelletizado 1,23 kg de 1,4-DCB y el secado un 1,26 kg de 1,4-DCB. Esta última etapa es la de mayor contribución debido a que presenta una quema in situ de residuos forestales para generar calor, la cual está vinculada al crecimiento y producción forestales, actividades de recolección, a los grandes requerimientos de combustible fósil y a las emisiones difusas derivadas de la aplicación de fertilizantes a base de fósforo y otros insumos para la obtención de biomasa (Salles et al., 2018; Dias & Arroja, 2012; González-García et al., 2014)

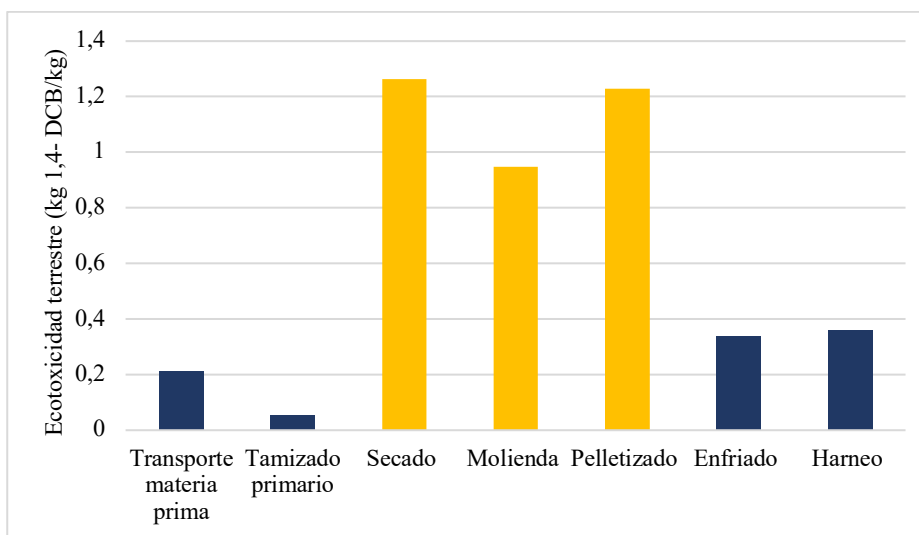


Gráfico 2. Comparación por etapas del proceso en relación a la ecotoxicidad terrestre.

En cuanto al calentamiento global, las etapas de mayor contribución fueron la etapa del pelletizado con un 0,7 kg de CO₂, molienda con un 0,4 kg de CO₂ y la de secado con un 0,25 kg de CO₂ como se observa el Gráfico 3.

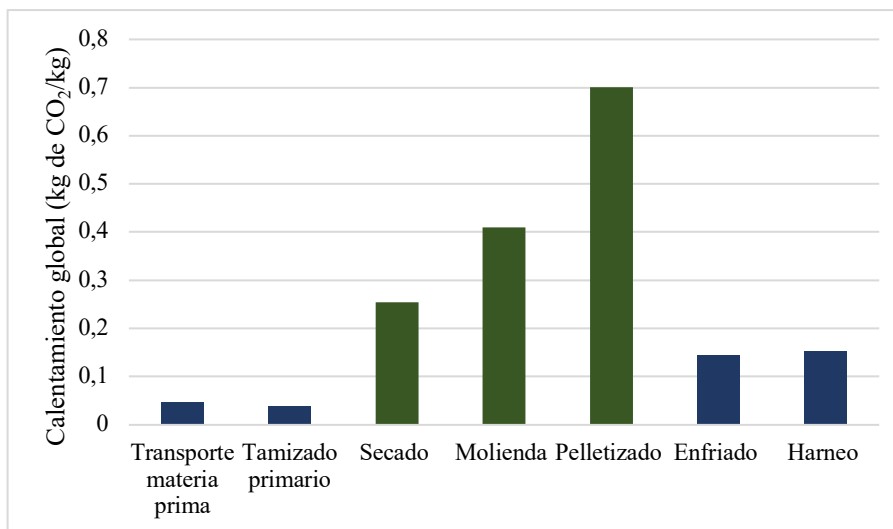


Gráfico 3. Comparación por etapas del proceso productivo en función a la categoría del CG.

De acuerdo con Adams et al. (2015), las emisiones de esta categoría son aportadas por dos grandes fuentes de energías: calor y electricidad. La etapa de pelletizado presentó mayor contribución debido al consumo eléctrico de la maquinaria. Este consumo es consistente con este tipo de producción, siendo pasos esenciales para la densificación de la madera con el fin de transformar los voluminosos residuos de madera en un recurso energético útil, limpio y para facilitar el transporte a larga distancia (Magelli et al., 2009).

Si bien la etapa de secado presenta menores impactos, los que se atribuyen a una emisión directa por la quema in situ de la biomasa forestal, este menor impacto puede deberse al uso de biomasa renovable (emisiones biogénicas de gases con efecto invernadero) como combustible para el secador (Martín-Gamboa et al., 2020), en comparación con la electricidad utilizada en el pelletizado.

Al saber que estas etapas son las que generan los mayores impactos, es posible realizar gestiones centradas en estas categorías y reducir los impactos que provocan.

6.3.8 Comparación de categorías de impactos a través de la normalización

A través de la normalización de los resultados es posible comparar los impactos entre las categorías evaluadas. En el Gráfico 4, se observa que los resultados de las categorías que tuvieron mayores relevancias fueron: las eutrofización de agua dulce y la formación de partículas finas del proceso, lo que es concordante con los resultados entregados por Ruiz et al. (2017), donde las categorías de eutrofización del agua dulce, formación de partículas, toxicidad humana, seguida de la

ecotoxicidad en agua dulce, debido al calor y la electricidad utilizados en la producción de pellets, generan el mayor impacto en el proceso. Además, en el estudio de Salles et al. (2018) asocian el uso de fertilizantes químicos en las operaciones forestales como un contribuyente en categorías de impacto, las cuales están relacionados con los residuos forestales que después son utilizados en la combustión de biomasa del secador.

La ampliación del sistema junto con proporcionar precisión en los datos del proceso, permite dar paso a futuros estudios más completos que evalúen nuevamente las categorías en estudio, pero incluyendo el resto de las categorías de impacto como la ecotoxicidad, toxicidad y uso de suelo en el estudio, ya que ésta ha demostrado ser relevantes comparativamente.

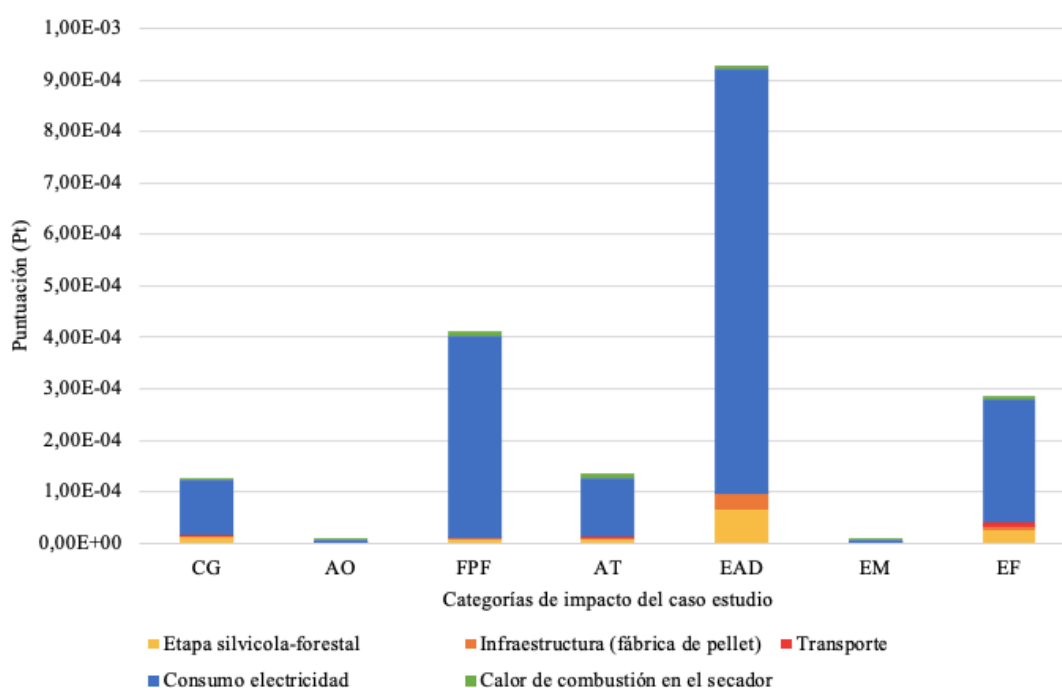


Gráfico 4. Normalización de impacto del proceso global.

6.4 Comparación de los datos de producción de pellet con otras producciones de combustibles fósiles convencionales.

Por último, teniendo los resultados del proceso de producción de pellets es posible comparar estos datos con otros reportados para combustibles fósiles convencionales. Los combustibles seleccionados fueron carbón, gas licuado, diésel y pellets. De acuerdo con los límites del sistema del estudio las comparaciones que se llevaron a cabo fueron los alcances de la cuna a la puerta de estos combustibles. Se consideró como unidad funcional 1MJ de energía química presente en cada combustible y se utilizó el mismo método empleado anteriormente ReCiPe midpoint (H). Los datos

fueron obtenidos de la base de datos Ecoinvent V3.5 y comparados en el programa SimaPro 9. Las categorías de impacto que destacaron en el perfil fueron: calentamiento global y escasez de recursos fósiles, los que se muestran en los Gráfico 5 y Gráfico 6, respectivamente. En las categorías restantes los resultados no fueron tan significativos en el perfil por lo que se excluyen de la comparación.

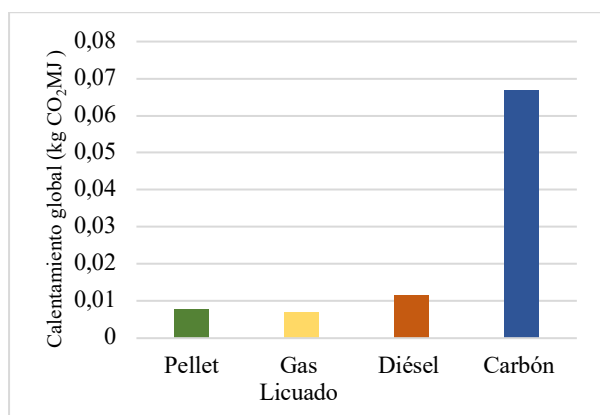


Gráfico 5. Comparación de combustibles en relación al impacto de calentamiento global, unidad funcional de 1 MJ.

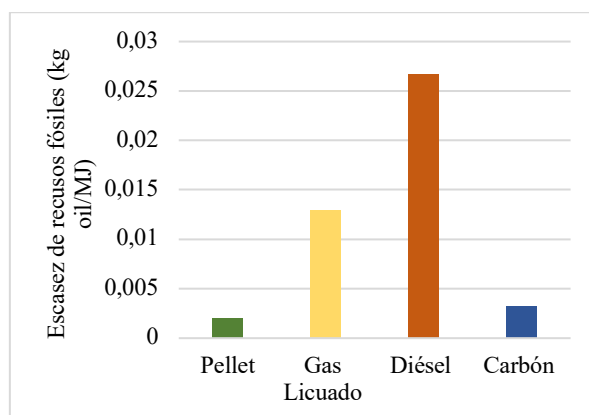


Gráfico 6. Comparación de combustibles en relación al impacto escasez de recursos fósiles, unidad funcional de 1 MJ.

En ambas categorías se observó que el pellet representó menores cargas que los otros combustibles en comparación. El calentamiento global es una de las categorías más relevantes, donde el carbón fue el combustible con mayor huella de carbono, 0,067 kg de CO₂, mientras en la categoría de escasez de recursos fósiles, los principales contribuyentes son el combustible diésel con un 0,026 kg oil eq y el gas licuado con un 0,013 kg oil eq, ambos derivados del petróleo y utilizados en la producción de electricidad y calor y uso en motores (MinEnergía, 2017). Ambas categorías impactan al ambiente en relación a la participación de combustibles fósiles convencionales (Seebach, 2019).

De acuerdo con Castañeda & Arciniegas (2019) la producción de pellets genera menos emisiones de GEI que los combustibles fósiles convencionales, por lo que su uso en diferentes sectores que requieran de la generación de electricidad y energía calórica, ayudaría a reducir los impactos de las cargas ambientales de los procesos productivos y permitiría introducir una energía más eficiente y limpia a la matriz energética del país (Yilmaz & Selim, 2013).

Si bien la comparación entre los distintos combustibles consideró un alcance de la cuna a la puerta, una manera de mejorar esta comparación sería expandir los límites del sistema, abordando las fases de uso y disposición final, donde son claves las formas en que el cliente o consumidor usa el combustible y la forma en que el residuo vuelve al ambiente. De esta manera, se logra un análisis más completo e integral del sistema.

6.5 Medidas de gestión ambiental para el proceso de producción de pellets

De acuerdo con el perfil ambiental se ha demostrado que las necesidades de electricidad y calor en la fabricación de pellets tienen un papel clave en el proceso. Por lo que evaluar cómo podrían reducirse los impactos relacionados con estas fuentes de energías ayudarían a la reducción de impacto y mejorarían el perfil ambiental. Una alternativa para reducir la dependencia de la matriz eléctrica chilena es implementar una planta de cogeneración en plantas productoras. Esto mejoraría significativamente los rendimientos energéticos del proceso, ya que la cogeneración permite alcanzar un uso más eficiente de los recursos primarios cuando el proceso requiere más de una forma de energía como lo es la producción de pellets (energía eléctrica y térmica), proporcionando así su propia electricidad y donde se aprovecharía residuos y sub productos forestales como combustible en procesos de cogeneración.

Por otro lado, la gestión e implementación de nuevas tecnologías en el proceso conduciría a mitigar emisiones y residuos. Si bien en el estudio no se consideraron las características de maquinarias ni sistemas de control, se debe tener en cuenta que la utilización y combinación de sistemas de tratamientos de gases pueden garantizar la eliminación de casi la totalidad de los contaminantes atmosféricos, alcanzando niveles de emisión atmosférica inferiores a los legislados. Gestionar en el proceso herramientas de control de emisiones garantiza el control del impacto ambiental asociado a las emisiones de gases de combustión.

7. CONCLUSIÓN, RECOMENDACIONES Y LIMITACIONES

7.1 Conclusiones

En este estudio se analizaron los impactos potenciales que trae consigo la producción de pellet de madera y los resultados mostraron que:

- La metodología de evaluación de ciclo de vida aplicada a la producción de pellets en Chile permitió conocer detalladamente las etapas de la cadena de valor del producto, identificar y cuantificar las cargas ambientales de cada etapa y del proceso global, mostrando que es una herramienta efectiva para determinar el impacto ambiental. Además, esta metodología permite oportunidades de mejora en el proceso pudiendo gestionar los potenciales impactos ambientales.
- Se determinó que la carga ambiental global se debió principalmente al uso de electricidad en la producción de pellets, la cual fue responsable de más del 80% del impacto. Con efectos más notorios en las siguientes categorías evaluadas: formación de partículas finas, calentamiento global, eutrofización de agua dulce y marina.
- La combustión de biomasa para generación de calor requerido en el proceso de secado, produjo cargas ambientales principalmente en la categoría de agotamiento de la capa de ozono con un 28,9%.
- Los resultados de normalización de las categorías de impacto mostraron que la eutrofización de agua dulce y la formación de partículas finas son las más relevantes en el perfil.
- La comparación entre las etapas de proceso arrojó que la ecotoxicidad de agua dulce y la categoría de calentamiento global fueron las más relevantes. Ambas categorías están principalmente vinculadas a las etapas de generación eléctrica, insumo clave para las etapas de secado, molienda y pelletizado.
- La producción de pellet presentó una carga ambiental inferior a los combustibles fósiles con los que se comparó, en al menos dos categorías (cambio climático y escasez de recursos fósiles), por lo cual resulta atractivo el reemplazo de estos combustibles fósiles por pellet, especialmente para generación de energía térmica y/o eléctrica

7.2 Recomendaciones y limitaciones

7.2.1 Recomendación

Teniendo en cuenta que esta habilitación se centró en el proceso de elaboración del pellet, considerando información obtenida de empresas productoras, DIA y literatura, los resultados logrados son sólo una primera aproximación de una evaluación ambiental con énfasis en ciclo de vida, y no son representativos de todo el rubro. Por lo que se sugiere realizar mejoras en futuros análisis de la producción de pellets de madera. Estas sugerencias incluyen: obtener datos (recursos materiales y de energías) más precisos de las distintas etapas del proceso mediante visitas a distintas plantas productoras, lo que permitiría una visión del perfil más completa y representativa a los productores del rubro. Otra recomendación es realizar una ampliación del sistema estudio, abarcando desde la cuna a la tumba de la cadena de valor del pellet. Para ello se requiere de información más detallada de la obtención de la materia prima (extracción de madera, transporte, manufactura, etc.) y de los procesos posteriores a la fabricación del pellet (almacenamiento, distribución, transporte hasta usuario final, uso final del producto y disposición, reciclaje y disposición final), obteniendo datos de fuentes directas en vez de utilizar bases de datos internacionales.

7.2.2 Limitaciones

Respecto a las limitaciones de la investigación, el no contar con información precisa de algunas etapas principales del proceso como extracción y producción implicó reducir el alcance del sistema. Por lo que, los resultados del estudio no representan al rubro de pellet global. Ampliar la cobertura geográfica y tecnológica mejoraría los datos para un futuro estudio del análisis.

Además, no haber podido visitar las plantas de producción de pellets debido a las cuarentenas implementadas en la región por la crisis sanitaria que se vive a nivel mundial, no permitió conocer en primera persona el proceso productivo en estudio y conseguir de mejor manera los datos de producción.

8. REFERENCIAS

- Adams, P.W.R., Shirley, J., & McManus, M. (2015). Comparative cradle to gate life cycle assessment of wood pellet production with torrefaction. *Applied Energy*, volume 138, pp 367-380. 10.1016/j.apenergy.2014.11.002
- Alakangas, E. & Paju, P. (2002). Wood Pellets in Finland – technology, economy, and market. Diciembre, 2020, de market. OPET Report 5. Jyvaskyla. VTT Processes. Sitio web: https://cris.vtt.fi/ws/files/52184787/wood_pellet_in_finland_compress.pdf
- Asociación Chilena de Biomasa. (2017). Biomasa en Chile: El debate de lo que viene. Diciembre, 2020, de Asociación Chilena de Biomasa. Sitio web: <https://achbiom.cl/biomasa-en-chile-el-debate-que-viene/>
- Asociación Chilena de Biomasa. (2019). Informe: Observatorio Pellets 2019. Enero, 2021, de Asociación Chilena de Biomasa. Sitio web: <http://achbiom.cl/biblioteca/>
- Asociación Española de Valorización Energética de la Biomasa. (23 de septiembre del 2014). Cómo se producen los pellet (Archivo de video). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=MbEZJyv61Lg>
- Bioenergy Europe. (2020). Pellet Report- European Bioenergy Outlook. Diciembre, 2020, de Bioenergy Europe Sitio web: <https://bioenergyeurope.org/>
- Comisión Nacional de Energía, Cooperación técnica alemana & Comisión Nacional del Medio Ambiente. (2007). Guía para evaluación ambiental energías renovables no convencionales- Proyecto de biomasa. Junio, 2021, de Comisión Nacional de Energía. Sitio web: <https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/guiabiomasacia.pdf>
- Castañeda, Y. & Arciniegas, N. (2019). Diseño de una planta productora de pellets de madera a partir del aprovechamiento de residuos forestales de una aserrío ubicado en la ciudad de

- Bogotá. (Especialización gestión de proyectos de ingeniería) Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad de Ingeniería, Bogotá, Colombia. Recuperado de: <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/16276/Casta%C3%B1edaMoralesYeraldine2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cocchi, M., Nikolaisen, L., Junginger, M., Goh, C. S., Hess, R., Jacobson, J., Ovard, L. P., et al. (2011). Global wood pellet industry, market and trade study, de IEA Bioenergy- Task 40: Sustainable International Bioenergy trade, Paris, France. Recuperado de: https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/iea_pdf/reports/iea_task40_wood_pellet_industry_market.pdf
- Deloitte. (2016). Sector energía 1: Marco regulador y matriz energética Chile. Junio, 2021, de Deloitte Sitio web: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cl/Documents/energy-resources/cl-er-estudio-energ%C3%ADa-chile-parte1.pdf>
- Doussoulin, E. (2007). La bioenergía: un nuevo desafío para el desarrollo del desierto en Chile. *Idesia (Arica)*, 25 (2), pp 5-6. Recuperado de: <https://dx.doi.org/10.4067/s0718-34292007000200001>
- Díaz, L. (16 de marzo 2017). Especialista afirma que urge reemplazar la leña por pellet, para reducir los altos niveles de contaminación atmosférica. *Usach al Día*. Recuperado de: <https://www.usach.cl/news/especialista-afirma-urge-reemplazar-la-leña-pellet-para-reducir-los-altos-niveles-1>
- Escobar, J. & Weil, E. (2018). Identificación de la cadena productiva de la elaboración de pellets de madera. Recuperado de: <http://achbiom.cl/wp-content/uploads/2018/11/Consultoria-Pellets-CORFO-Final.pdf>
- Esen, M., & Yuksel, T. (2013). Experimental evaluation of using various renewable energy sources for heating a greenhouse. *ELSERVIER-Energy and Buildings* 65, pp 346-348. Recuperado de:

https://www.academia.edu/24114376/Experimental_evaluation_of_using_various_renewable_energy_sources_for_heating_a_greenhouse

Fredes, N. (2014). Evaluación técnica y económica de una planta de producción de combustible sólido a partir de biomasa forestal en la Región de Los Lagos. (Tesis pregrado). Universidad de Chile, facultad de ciencias físicas y matemáticas, departamento de ingeniería química y biotecnología, Chile. Recuperado de: http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/116613/cf-fredes_nn.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Gaete-Morales, C., Gallego-Schmid, A., Stamford, L., & Azapagic, A. (2018). Assessing the environmental sustainability of electricity generation in Chile. *Science of the Total Environment*, 636, pp 1155–1170. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.346>.

Golsteijn, L. (2012). ReCiPe. Enero 2021, de Pre-sustainability Sitio web: <https://pre-sustainability.com/articles/recipe/>

González, G. (2012). Diseño de una planta de Pelletización en Castilla y León. (Tesis pregrado). Universidad Carlos III de Madrid, departamento de ciencias e ingeniería de materiales e ingeniería química. España. Recuperado de: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/14463/PFC_Guillermo_Gonzalez_Yanquez.pdf

González, A. & Pucciarelli, G. (2019). Producción de pellet de madera a base de residuos y subproductos de la industria forestal. (Tesis pregrado). Universidad tecnológica nacional, facultad regional la plata, Argentina. Recuperado de: <https://ria.utn.edu.ar/bitstream/handle/20.500.12272/4222/Producci%C3%B3n%20de%20pellet%20de%20madera%20a%20base%20de%20residuos%20y%20subproductos%20de%20la%20industria%20forestal.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Huber, E., O'Ryan, R., Morales, D., Donoso, E., Pacheco, A., Figueroa, C., Aguayo, C., De la Maza, C. (3 de Julio de 2019). Biomasa: Potencial en alza. *Electricidad la revista energética de Chile*. Recuperado de: <https://www.revistaei.cl/reportajes/biomasa-potencial-al-alza/>
- Instituto Sindical de Trabajo, Ambiente y Salud. (2021). Problema ambiental del consumo de energía. Recuperado de: <https://istas.net/istas/guias-interactivas/ahorro-y-eficiencia-energetica/problema-ambiental-del-consumo-de-energia>
- Instituto forestal. (2020). Boletín estadístico n°174 anuario forestal chileno statistical yearbook of forestry 2020. Enero 2021. Recuperado de: <https://wef.infor.cl/publicaciones/publicaciones.php#p0>.
- Instituto Forestal. (2020). Infor desarrolla estudio de posicionamiento a la región del Biobío como principal productor de pellet. Diciembre, 2020. Recuperado de: <https://www.infor.cl/index.php/noticias/568-infor-desarrolla-estudio-que-posiciona-a-la-region-del-biobio-como-principal-productor-de-pellet-en-chile>
- International Standard Organization. (2006). 14040:2006. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. Has been adopted without modification (IDT) as CSA Standard CAN/CSA-ISO 14040:06. National Standards of Canadá by Standards Council of Canadá.
- International Standard Organization. (2006). 14044:2006. Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. Has been adopted without modification (IDT) as CSA Standard CAN/CSA-ISO 14044:06. National Standard of Canadá by the Standards Council of Canadá.
- Konkin, B., Beauchemin, P., & Tampier, M. (2010). Emissions and Air Pollution Controls for the Biomass Pellet Manufacturing Industry. The BC Ministry of the Environment, British Columbia.

- Kylili, A., Christoforou, E., & Fokaidis, P. A. (2016). Environmental evaluation of biomass pelleting using life cycle assessment. Elsevier - Biomass and Bioenergy, Volume 84, pp 107e117. Doi: 10.1016/j.biombioe.2015.11.018
- Laschi, A., Marchi, E., & González-García, S. (2016). Environmental performance of wood pellets' production through life cycle analysis. Elsevier - Energy, Volume 103, pp 469-480. DOI: 10.1016/j.energy.2016.02.165
- Ministerio del Medio Ambiente. (2014). Planes de descontaminación, estrategia 2014-2018. Noviembre, 2020, de Ministerio del medio ambiente Sitio web: http://www.mma.gob.cl/1304/articles56174_Plan_Descont_Atmosferica_2014_2018.pdf
- Magelli, F., Boucher, K., Bi, H., Melin, S., & Bonoli, A. (2009). An environmental impact assessment of exported wood pellets from Canada to Europe. Elsevier- Biomass & Bioenergy. 33, pp 434-441. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.016>
- Martínez, S. (2009). Evaluación de la biomasa como recurso energético renovable en Cataluña. (Tesis doctoral). Universidad de Girona, España. Recuperado de: <https://dugi-doc.udg.edu/bitstream/handle/10256/4849/tsml1de1.pdf?isAllowed=y&sequence=5>
- Martín-Gamboa, M., Marques, P., Freire, F., Arroja, L., & Días, A. C. (2020). Life cycle assessment of biomass pellets: A review of methodological choice and results. Portugal: Elsevier. volumen 133. Doi: 10.1016/j.rser.2020.110278
- Ministerio de Energía. (2017). Plan mitigación de gases de efecto invernadero para el sector energía. Noviembre, 2020. Recuperado de: <https://energia.gob.cl/sites/default/files/plan-mitigacion-gei-sector-energia-2017.pdf>
- Ministerio de Energía. (2019). Planificación Energética de largo plazo periodo 2018-2022. Informe de actualización de antecedentes. Noviembre, 2020. Recuperado de:

https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/20191209_actualizacion_pelp_-_iaa_2019.pdf.

Ministerio de energía. (2015). Política energética en Chile: Energía 2050. Chile: Agencia internacional de Energía (IEA). Noviembre, 2020. Recuperado de: https://energia.gob.cl/sites/default/files/energia_2050_-_politica_energetica_de_chile.pdf

Ministerio de transporte y telecomunicaciones. (2010). Decreto-94 08-JUN-1991. Chile: Biblioteca del Congreso. Diciembre, 2020. Recuperado de: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=9104>

Ministerio del Medio Ambiente a (2020). Cambio climático. Diciembre, 2020. Recuperado de: <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/que-es-el-cambio-climatico/>.

Ministerio del Medio Ambiente b (2020). Huella de carbono. Diciembre, 2020. Recuperado de: <https://mma.gob.cl/cambio-climatico/cc-02-7-huella-de-carbono/>

Ministerio del Medio Ambiente. (2019). Informe del inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero de Chile, Santiago, Chile. Abril, 2021. Recuperado de: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/7305681_Chile-BUR4-1-2020_IIN_CL.pdf

O'Ryan, R. (5 de Febrero de 2020). La biomasa será energía de respaldo para las renovables intermitentes. Electricidad, la revista energética de Chile. Junio, 2021. Recuperado de: <https://www.revistaei.cl/entrevistas/rodrigo-oryan-la-biomasa-sera-la-energia-de-respaldo-para-las-renovables-intermitentes/#:~:text=las%20renovables%20intermitentes%E2%80%9D-,Rodrigo%20O'Ryan%3A%20%E2%80%9CLA%20biomasa%20ser%C3%A1%20la%20energ%C3%ADa%20de,energ%C3%A9tica%2C%20especialmente%20a%20nivel%20regional>

- Orellana, R. (28 de Febrero del 2013). Cogeneración en industrias. *Electricidad, la revista energética de Chile*. Junio, 2021. Recuperado de: <https://www.revistaei.cl/reportajes/cogeneracion-en-industrias/>
- Paneque, M., Román-Figueroa, C., Vásquez-Panizza, R., Arriaza, J., Morales, D., Zulantay, M. (2011). *Bioenergía en Chile*. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile. Recuperado de: <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/178573/Bioenergia-en-Chile.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pergola, M., Galdini, A., Celano, G., Basile, M., CAniani, D., Cozzi, M., Gentilesc, T., Mancini, I., Pastore, V., Romano, S., Ventura, G. & Ripullone, F. (2017). An environmental and economic analysis of the wood-pellet chain: two case studies in Southern Italy. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, volume 23, pp1675–1684. Recuperado de: <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1374-z>
- Peric, M., Antonijevic, D., Komatina, M., Bugarski, B., & Rakin, M. (2020). Life cycle assessment of wood chips supply chain in Serbia. *Renewable Energy*, Elsevier, volume 155, pp 1302-1311. Recuperado de: [10.1016/j.renene.2020.04.026](https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.026)
- Popp, J., Kovacs, S., Oláh, J., Divéki, Z., & Balázs, E. (2021). Bioeconomy: Biomass and biomass-based energy supply and demand. *New Biotechnology*, 60, pp 76-84. Recuperado de: <https://doi-org.recursosbiblioteca.unab.cl/10.1016/j.nbt.2020.10.004>
- Porflit, F. (5 de Julio de 2018). *Comprometidos con el buen uso de la leña*. Ministerio de Energía. Mayo, 2021. Recuperado de: <https://energia.gob.cl/noticias/los-rios/comprometidos-con-el-buen-uso-de-la-lena>.

- Primagas. (21 de Julio de 2020). Impacto del consumo de energía en el medioambiente y las personas. Junio, 2021. Recuperado de: <https://blog.primagas.es/impacto-del-consumo-de-energia-medioambiente>.
- Quinteiro, P., Greco, F., Da Cruz, L. A., Righi, S., Arroja, L., & Días, A. C. (2020). A comparative life cycle assessment of centralized and decentralised wood pellets production for residential heating. Elsevier Science, volume 730. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139162
- Romero, A. (2010). Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles. Revista Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, volumen 104, N°. 2, pp 331-345. Recuperado de: <ps://rac.es/ficheros/doc/00979.pdf>
- Romero, B. (2003). El Análisis del Ciclo de Vida y la Gestión Ambiental. Tendencias tecnológicas. Recuperado de: <https://www.ineel.mx/boletin032003/tend.pdf>
- Ruiz, D., San Miguel, G., Corona, B., & López, F. (2017). LCA of a multifunctional bioenergy chain based on pellet production. Elsevier- Fuel, volumen 215, pp 601-611. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.11.050>
- Salles, F., Lopes, D. A., Hideyoshi, F., Rocco, F. A., & Gonzalez-Garcia, S. (2018). Environmental Life Cycle Assessment of industrial pine roundwood production in Brazilian forests. Science of the total Environment, volume 640-641, pp 599-608. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.262>
- Seebach, C. (2019). Futuro de la energía, crisis climática y electricidad Oportunidad de la electricidad en la descarbonización de la matriz energética. Generadoras de Chile. Mayo, 2021. Recuperado de: <http://generadoras.cl/media/page-files/910/190627%20Presentacion%20Futuro%20de%20la%20energia%20crisis%20clim%C3%A1tica%20y%20electricidad.pdf>

- Sikkema, R., Steiner, M., Junginger, M., Hiegl, W., Hansen, M., & Faaij, A. (2011). Los mercados europeos de pellets de madera: situación actual y perspectivas para 2020. *Biocombustibles Bioprod Biorefining*, pp. 250 – 278. Doi: 10.1002 / bbb.277.
- Sjølie, H. K., & Solberg, B. (2011). Greenhouse gas emission impacts of use of Norwegian wood pellets: a sensitivity analysis. *Environmental Science and Policy*, volume 14(8), 1028-1040. Doi: 10.1016/j.envsci.2011.07.011
- Tapia, D. (4 de septiembre del 2019). Biomasa en Chile: En búsqueda de un mayor fortalecimiento. *Revista nme: nueva minería y energía*. Enero 2021. Recuperado de: <https://www.nuevamineria.com/revista/biomasa-en-chile-en-busqueda-de-un-mayor-fortalecimiento/>
- Thakur, A., Canter, C., & Kumar, A. (2014). Life-cycle energy and emission analysis of power generation from forest biomass. *Applied Energy*, Elsevier, volume 128, pp 246–253. Doi: 10.1016/j.apenergy.2014.04.085
- Yilmaz, S., & Selim, H. (2013). A review on the methods for biomass to energy conversion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volume 25, pp 420-430. Doi: 10.1016/j.rser.2013.05.015
- Yuste, P. (2014). Análisis de ciclo de vida para el diseño de materiales sostenibles. Obtenido de *Certificados energéticos*. Noviembre, 2020. Recuperado de: <https://www.certificadosenergeticos.com/analisis-ciclo-vida-diseno-materiales-sostenibles>

ANEXOS

Anexo A: Propiedades materia prima y del pellet.

1.- Propiedades del aserrín Pino Radiata

Tabla 7. Características aserrín Pino Radiata.

Característica	Unidad	Valor
Poder Calorífico Inferior	[kcal/Kg]	3.948 (Con humedad del 10%)
	[kcal/Kg]	1.474 (Con humedad del 56%)
Poder Calorífico Superior	[kcal/Kg]	4.800 (Base seca)
Humedad	[% en peso]	25-40 (Base húmeda)
Densidad Básica	[Kg/m ³]	400 (Con 30% de humedad)
Densidad Básica	[Kg/m ³]	167 (Con 15,5% de humedad)
Porosidad	[% en volumen]	75-90
Cenizas e Impurezas	[% en peso]	0,5 - 2
Emisiones CO ₂	[Kg gas/Kg combustible]	1,85

Fuente: Fredes, 2014

2.- Propiedades del pellet

A continuación, en la tabla 8 se presenta en detalle los parámetros de calidad de 3 categorías de pellet de acuerdo a lo establecido en la NORMA UNE-ISO 17225-2:2014.

Tabla 8. Propiedades de los pellets de madera.

Parámetro	A1	A2	B
Diámetro en mm	6 u 8	6 u 8	6 u 8
Longitud en mm	Entre 3,15 y 40	Entre 3,15 y 40	Entre 3,15 y 40
Humedad	Menor o igual a 10 %	Menor o igual a 10%	Menor o igual a 10%
Cenizas	Menor o igual a 0,7%	Menor o igual a 1,5%	Menor o igual a 3%
Durabilidad mecánica	Mayor o igual a 97,5%	Mayor o igual a 97,5%	Mayor o igual a 96,5%
Finos	Menor de 1%	Menor de 1%	Menor de 1%
Poder calorífico interior	Entre 16,5MJ/kg y 19MJ/kg	Entre 16,3MJ/kg y 19MJ/kg	Entre 16 MJ/kg y 19MJ/kg
Densidad Aparente	Mayor o igual a 600 kg/m ³	Mayor o igual a 600 kg/m ³	Mayor o igual a 600 kg/m ³
Nitrógeno	Menor o igual a 0,03%	Menor o igual a 0,05%	Menor o igual a 1%

Sulfuro	Menor o igual a 0,03%	Menor o igual a 0,03%	Menor o igual a 0,04%
Cloro	Menor o igual a 0,02%	Menor o igual a 0,02%	Menor o igual a 0,03%
Fusibilidades cenizas	Mayor o igual a 1200°C	Mayor o igual a 1100°C	Mayor o igual a 1100°C

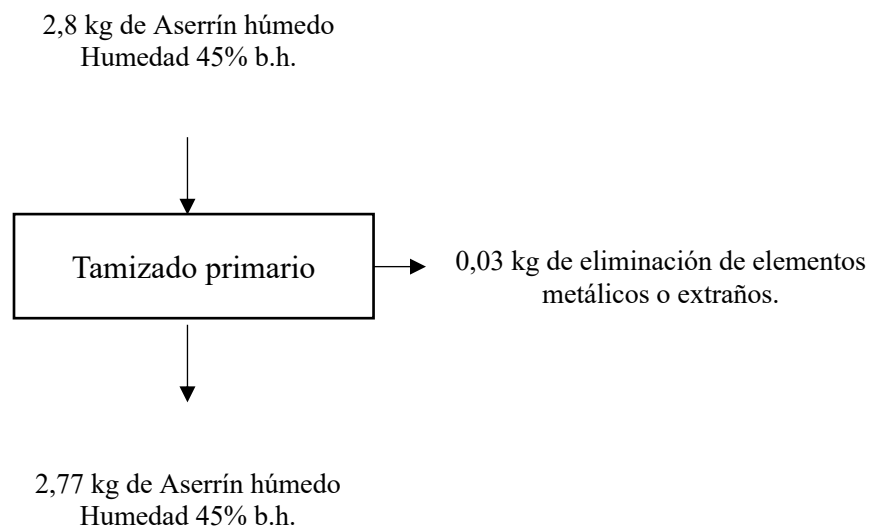
Anexo B: Balance de materia y energía de proceso de producción del pellet.

Para el cálculo de los datos de las entradas y salidas de masa y energía, se consideró una unidad funcional de 1 kg de pellet y una relación de aserrín húmedo a pellet de 2.8 kg (2,8 kg de aserrín húmedo equivale a la producción de un 1 kg de pellet).

1. Balance de materia y energía

a) **Etapa de Tamizado y homogenización**

En esta etapa hay pérdidas aproximadamente del 1% debido a la eliminación de materiales extraños o por un transporte inadecuado en las bodegas, el equipo de tamizado tiene una potencia unitaria del equipo de 3 KW.



$$\text{Pérdidas de elementos extraños} = 2,8 \text{ kg} * 1\% = 0,03 \text{ kg.}$$

$$\text{Materia prima útil} = 2,8 - 0,03 \text{ kg} = 2,77 \text{ kg de aserrín húmedo.}$$

b) **Etapa de Secado**

En esta etapa de proceso, la masa que ingresa sufre una disminución en su porcentaje de humedad, pasando de 45% a 10% con consecuente pérdida de agua. La energía requerida para el secado se obtiene de la combustión de parte de la biomasa que equivale a un 30% de aserrín seco que sale del secador.

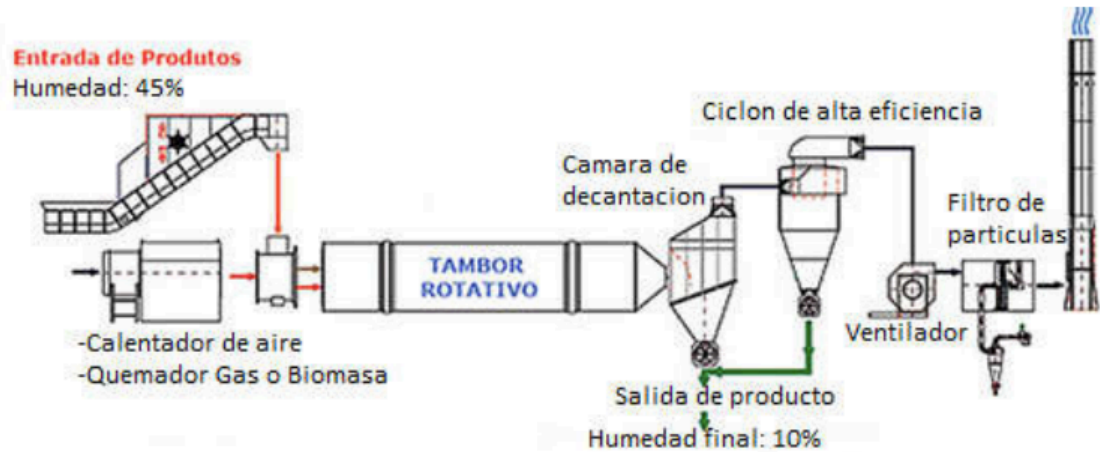


Figura 9. Esquema de la etapa de secado (González & Pucciarelli, 2019).

A continuación, se mostrarán los cálculos del balance masa y de las energías del sistema. Cálculo de pérdida de agua:

$$\text{Aserrín húmedo} = \text{Agua} + \text{Aserrín seco}$$

$$A = B + C$$

$$C = A - B$$

$$C = 2,772 \text{ kg} - B$$

Por lo tanto,

$$A (0,45) = B (1) + C (0,10)$$

$$2,77 * (0,45) = B (1) + 2,77 - B (0,10)$$

$$1,25 = B (1) + 0,277 - B (0,1)$$

$$1,25 - 0,277 = B (0,9)$$

$$0,97 / 0,9 = B$$

$$1,08 \text{ kg de agua de pérdida de agua} = B$$

$$C = 2,77 - 1,08 \text{ kg} = 1,69 \text{ kg de aserrín seco}$$

De la salida de la etapa de secado, se utiliza el 30 % de materia prima seca como combustible del secador, la que corresponde a:

$$\text{Combustible de biomasa} = 1,69 \text{ kg} * 30\% = 0,51 \text{ kg}$$

$$\text{Materia prima útil} = 1,69 - 0,51 = 1,18 \text{ kg de aserrín seco}$$

Para la energía necesaria para la combustión de biomasa seca en el secador, se obtuvo de la cantidad de combustible que entra por el poder calorífico inferior de aserrín a 10% de humedad. Considerando el poder calorífico inferior del pino radiata 3.948 kCal/kg (Con humedad del 10%) el cual equivale a 16,5 MJ/kg. La energía necesaria se obtiene:

$$\begin{aligned} \text{Energía} &= \text{Consumo de combustible} \times \text{Poder calorífico inferior} \\ &= 0,51 \text{ kg} \times 16,5 \text{ MJ/kg} \\ &= 8,43 \text{ MJ} \end{aligned}$$

La estimación de la emisión del contaminante i (E_i), consiste en la cantidad de combustible consumido “CC” que ingresa al secador rotatorio y el factor de emisión seleccionado (asociado al tipo de combustible) para el contaminante i “FE i ”.

$$E_i = (FE_i) \times (CC)$$

$$\begin{aligned} \text{Emisión (PM)} &= 2,1 \text{ kg/ton} \times 0,00051 \text{ ton} \\ \text{Emisión (PM)} &= 0,0011 \text{ kg} \\ \text{Emisión (PM}_{10}) &= 1,25 \text{ kg/ton} \times 0,00051 \text{ ton} \\ \text{Emisión (PM}_{10}) &= 0,0006 \text{ kg} \\ \text{Emisión (CPM)} &= 0,75 \text{ kg/ton} \times 0,00051 \text{ ton} \\ \text{Emisión (PM)} &= 0,0004 \text{ kg} \\ \text{Emisión (NO}_x) &= 0,35 \text{ kg/ton} \times 0,00051 \text{ ton} \\ \text{Emisión (NO}_x) &= 0,0002 \text{ kg} \\ \text{Emisión (CO)} &= 2,7 \text{ kg/ton} \times 0,00051 \text{ ton} \\ \text{Emisión (CO)} &= 0,0014 \text{ kg} \end{aligned}$$

En cuanto al calor necesario para eliminar el agua del aserrín, se obtiene lo siguiente:

Datos y supuestos

- 1) La corriente de entrada 1, es aserrín con un contenido de humedad del 45%
- 2)) La corriente de salida 3, es aserrín seco con un contenido de humedad inferior al 10%.
- 3) La corriente de entrada 2, es aire a 540°C con 0% de humedad.

4) La corriente de salida 4, es aire a 90° C, asumiendo aire saturado.

El calor necesario para eliminar el agua será aportado por el aire, siendo:

$$Q \text{ entrada} = m \text{ h}_2\text{O evaporada} * C_p \text{ h}_2\text{O liquido} (t_{\text{evapo}} - t_{\text{aserrín}})$$

$$Q \text{ entrada} = 1,078 \text{ kg de agua} * 4,18 \text{ kJ/kg}^* \text{K}^* (373 \text{ K} - 298 \text{ K})$$

$$Q \text{ entrada} = 337,95 \text{ kJ}$$

Conociendo la cantidad de calor que suministrará el aire durante el proceso de secado propiamente dicho, se calculará el caudal másico de aire necesario y los requerimientos de calor del mismo.

$$Q \text{ entrada} = m \text{ aire} * C_p \text{ aire} * (t_{\text{aire,e}} - t_{\text{aire,s}})$$

$$\text{masa aire} = Q_{\text{entrada}} / C_p \text{ aire} * (t_{\text{aire,e}} - t_{\text{aire,s}})$$

$$\text{Masa aire} = 334,5 \text{ kJ} / (1,005 \text{ kJ/kg}^* \text{K}^* (423 - 333) \text{ K})$$

$$\text{Masa aire} = 3,8 \text{ kg}$$

Conociéndole la densidad el aire 1,25 kg/m³, el volumen del aire será:

$$\text{Volumen aire} = 3,004 \text{ m}^3$$

Una vez conocida la corriente de aire a la entrada es necesario calcular los requerimientos de calor para la corriente de aire, los cuales se estiman:

$$Q \text{ aire} = \text{masa aire} * C_p \text{ aire} * (t_{\text{salida}} - t_{\text{entrada}})$$

$$Q \text{ aire} = 3,8 \text{ kg} * 1,005 \text{ kJ/kg}^* \text{K}^* (423 - 298) \text{ K}$$

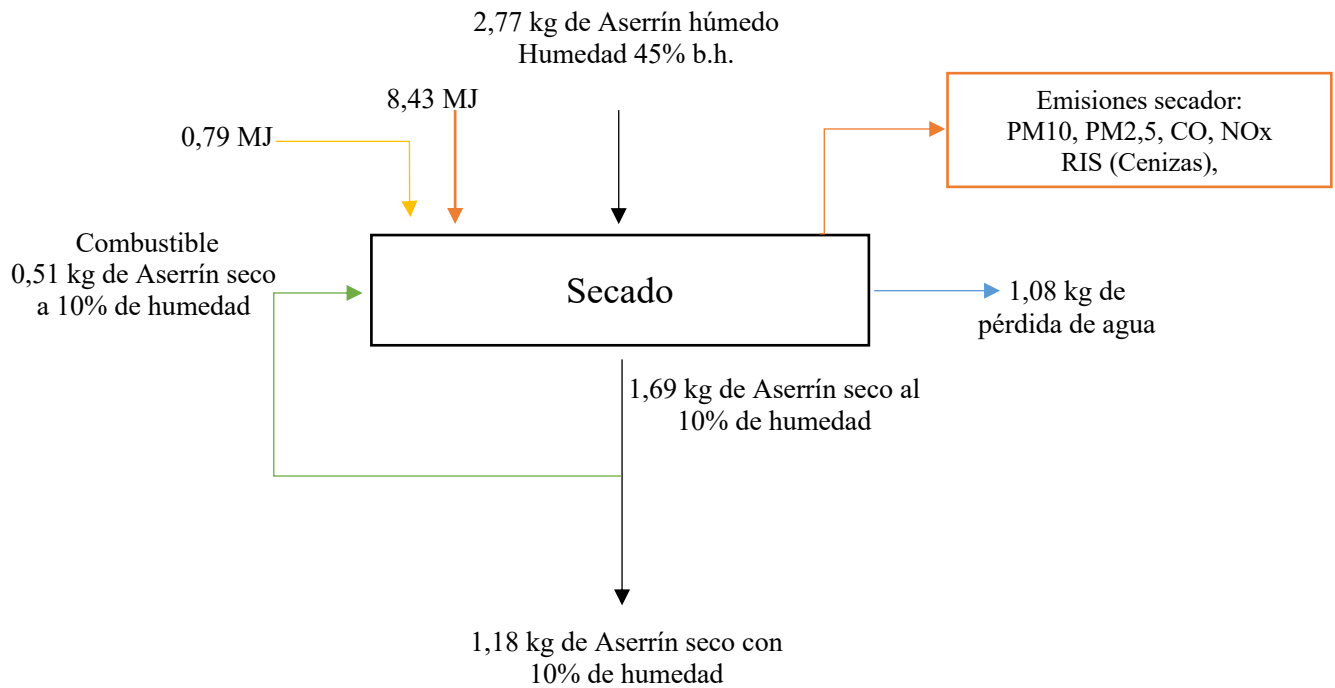
$$Q \text{ aire} = 475 \text{ kJ}$$

Con una eficiencia térmica del proceso de secado del 60 %, el calor requerido será:

$$Q_{\text{real}} = Q_{\text{m aire}} / \text{eficiencia}$$

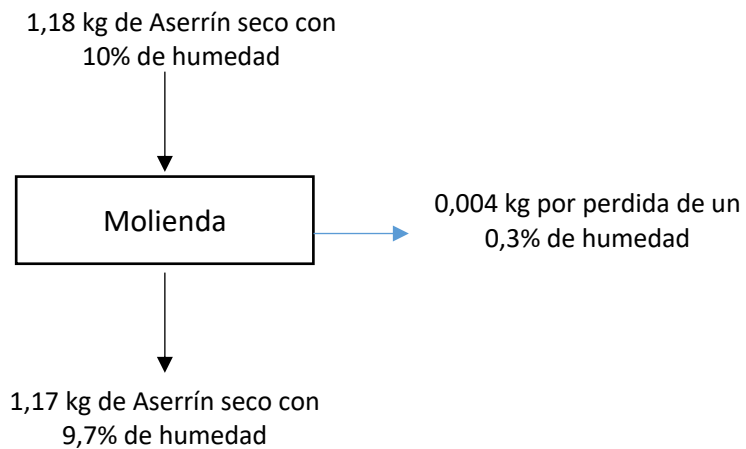
$$Q_{\text{real}} = 475 \text{ kJ} / 0,6 = 791,66 \text{ kJ} = 0,79 \text{ MJ} = 0,22 \text{ kWh}$$

A continuación, se muestra un esquema del sistema de secado, indicando sus entradas y salidas en función de la unidad funcional:



c) Etapa de Molienda

Se considera una baja en su humedad del 0,3%

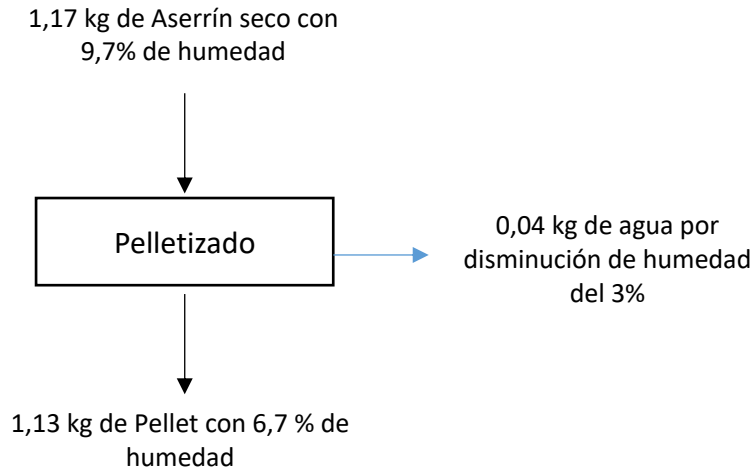


$$\text{Pérdida de humedad} = 1,18 \text{ kg} * 0,3\% = 0,004 \text{ kg}$$

$$\text{Materia prima útil} = 1,18 - 0,004 \text{ kg} = 1,17 \text{ kg de aserrín seco}$$

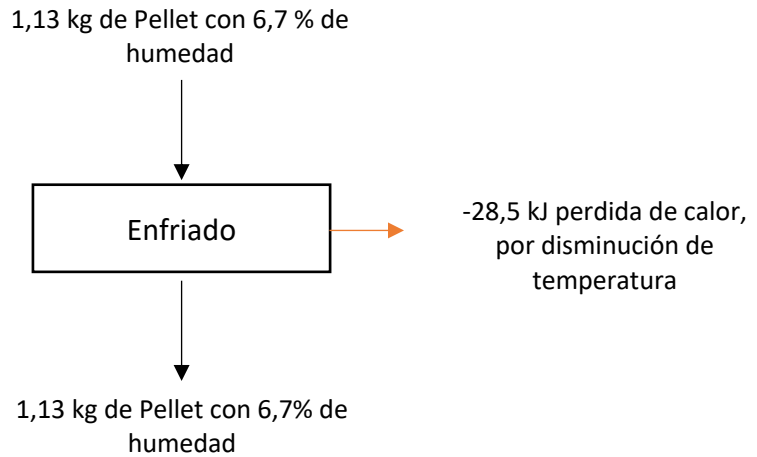
d) Etapa de Pelletizado

No hay pérdidas de residuo, pero sí de humedad aproximadamente un 3% y salen a una temperatura de alrededor de 80 a 100 °C



e) Etapa de Enfriado

La temperatura del pellet que ingresan desde la etapa anterior pasa de una temperatura de 80 °C a 20°C.



En esta etapa los pellets al pasar de una temperatura alta a una baja ocurren una pérdida de calor, la cual se presenta a continuación: 2300 J/kg°C

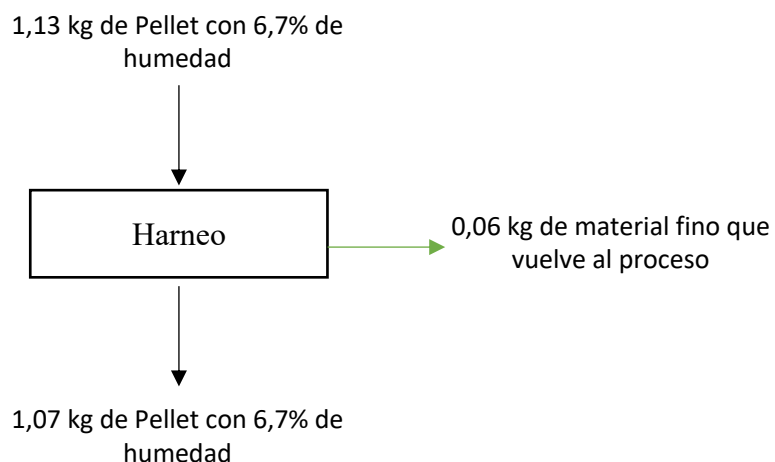
$$Q = masa * Cp * (\Delta T)$$

$$Q = 1,13 \text{ kg} * 2,3 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} * (20-80)^\circ\text{C}$$

$$Q = -155,94 \text{ kJ} = 0,16 \text{ MJ}$$

f) Etapa de Harneo

En la última etapa de producción los pellets se clasifican mediante un harnero, un 5 % del material fino que se separa en el harnero se vuelve a introducir en el proceso.



$$\text{Pérdida} = 1,13 \text{ kg} * 5\% = 0,06 \text{ kg}$$

$$\text{Materia prima útil} = 1,13 - 0,06 \text{ kg} = 1,07 \text{ kg de pellet}$$

2. Consumo de energía eléctrica

Se consideró el consumo de energía de equipos principales del proceso, donde al multiplicar la potencia total de cada equipo por la cantidad de horas de funcionamiento se podrá determinar la potencia máxima al día.

Tabla 9. Tiempos de producción de la planta.

Días al año	336	día/año
Días al mes	28	día/mes
Horas de producción	16	Horas x 2 turnos

Tabla 10. Consumo eléctrico por etapa de proceso.

Equipo	Potencia unitaria (kW)	Consumo eléctrico por día (kWh)	Consumo eléctrico/producción diaria (kWh)
Tamizado primario	3	48	0,01
Secador	12	192	0,03
Molino	150	2400	0,40
Pelletizado	345	5520	0,92
Enfriado	3	48	0,01
Tamizado	3	48	0,01
Total	516	8256	1,38

Anexo C: Resultados numéricos obtenidos de la recopilación de entrada/salida del proceso y datos de inventario que se introducen al Software SimaPro 9.

1. Datos del transporte de la materia prima

Se dan a conocer los datos de inventario de cada etapa del proceso que se introdujo al software SimaPro.

Tabla 11. Datos de características del transporte de materia prima.

Operación	Transporte
Carga útil	27 toneladas
Maquinaria	Camión Semirremolque
Peso	35.000 kg
Combustible	Diésel
Distancia recorrida	100 km
Flujo de camiones	12 camiones/día

2. Datos de entrada/salida de las operaciones unitarias del proceso de producción de pellet.

Resumen inventario para la fabricación de producción de pellet por etapas en relación a la unidad funcional (1kg de pellet) que ingresa al software SimaPro9.

Tabla 12. Resumen etapa de tamizado primario.

Etapa/entradas y salidas	Tamizado primario	
Entrada	Cantidad	Notas
Aserrín Húmedo	2,8 kg	45% de humedad en b.h.
Electricidad	0,01 kwh	Consumo de electricidad diario/producción diaria
Salida		
Aserrín Húmedo	2,77 kg	con 45% de humedad en b.h.
Pérdida de masa	0,03 kg	Pérdida de masa correspondiente al 1%

Tabla 13. Resumen etapa de secado.

Etapa/entradas y salidas	Secado	
Entrada	Cantidad	Notas
Aserrín Húmedo	2,77 kg	45% de humedad en b.h.
Electricidad	0,03 kwh	Consumo de electricidad diario/producción diaria
Combustible	0,51 kg	Aserrín seco como combustible

Energía	8,42 MJ	Calculado multiplicando el consumo de combustible por el poder calorífico del aserrín
Calor	0,22 MJ	Calor necesario para secar la materia prima
Salida		
Aserrín Seco	1,18	kg al 10% de humedad
Perdida de agua	1,08	kg de perdida de masa correspondiente al 1%
Material particulado	0,0011 kg	Emisión al aire
Material particulado 10	0,0006 kg	Emisión al aire
CO	0,0014 kg	Emisión al aire
NOx	0,0002 kg	Emisión al aire
Ceniza	0,0102 kg	Residuo sólido

Tabla 14. Resumen etapa de molienda

Etapa/entradas y salidas	Molienda	
Entrada	Cantidad	Notas
Aserrín seco	1,18 kg	Con 10% de humedad.
Electricidad	0,4 kwh	Consumo de electricidad diario/producción diaria
Salida		
Aserrín seco	1,17 kg	Con 9,7% de humedad.
Pérdida de agua	0,004 kg	Disminuye el porcentaje de humedad un 0,3%

Tabla 15. Resumen etapa de pelletizado

Etapa/entradas y salidas	Pelletizado	
Entrada	Cantidad	Notas
Aserrín seco	1,17 kg	kg con 9,7% de humedad.
Electricidad	0,92 kwh	Consumo de electricidad diario/producción diaria
Salida		
Pellet	1,13 kg	6,7% de humedad.
Pérdida de masa	0,04 kg	Pérdida de un 3% de humedad

Tabla 16. Resumen etapa de enfriado

Etapa/entradas y salidas	Enfriado	
Entrada	Cantidad	Notas
Pellets	1,3 kg	kg al 6,7% de humedad.
Electricidad	0,01 kwh	Consumo de electricidad diario/producción diaria
Salida		
Pellets	1,3 kg	kg al 6,7% de humedad.

Tabla 17. Resumen etapa de harneo

Etapa/entradas y salidas	Harneo	
Entrada	Cantidad	Notas
Pellet	1,13 kg	kg al 6,7% de humedad.
Electricidad	0,01 kwh	Consumo de electricidad diario/producción diaria
Salida		
Pellet	1,07 kg	6,7% de humedad.
Recirculación	0,06 kg	De material fino

Anexo D: Resultados numéricos obtenidos de la evaluación de impacto del Software SimaPro.

En cuanto a la metodología de evaluación de un ciclo de vida, se consideró el método ReCiPe 2016 *Midpoint V1.1* (H). En la tabla 18 se observa los indicadores de las categorías de impacto a evaluar y los factores de normalización del método utilizado.

Tabla 18. Caracterización de las categorías de impacto y factores de normalización del método ReCiPe 2016 *Midpoint V1.1* (H).

Categoría de impacto	Unidad	Factor de normalización
Calentamiento global	kg CO ₂ eq	0,0001252
Agotamiento del ozono estratosférico	kg CFC11 eq	16,7
Radiación ionizante	kq Co-60 eq	0,00208
Formación de ozono, Salud humana	kg NO _x eq	0,0486
Formación de partículas finas	kg PM _{2,5} eq	0,0391
Formación de ozono, ecosistemas terrestres	kg NO _x eq	0,0563
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	0,0244
Eutrofización de agua dulce	kg P eq	1,54
Eutrofización marina	kg N eq	0,217
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB	0,000965
Ecotoxicidad del agua dulce	kg 1,4-DCB	0,815
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DCB	0,969
Toxicidad carcinogénica humana	kg 1,4-DCB	0,361
Toxicidad humana no cancerígena	kg 1,4-DCB	0,00671
Uso del suelo	m ² a crop eq	0,000162
Escasez de recursos minerales	kg Cu eq	0,00000833
Escasez de recursos fósiles	kg oil eq	0,00102
Consumo de agua	m ³	0,00375

1. Resultados de las categorías de impacto del proceso global: caracterización y normalización.

Tabla 19. Resultado de caracterización las categorías de impacto del proceso global.

Categoría de impacto	Unidad	Producción de 1kg de pellet
Calentamiento global	kg CO ₂ eq	1,00
Agotamiento del ozono estratosférico	kg CFC11 eq	5,90E-07
Radiación ionizante	kq Co-60 eq	0,015
Formación de ozono, Salud humana	kg NO _x eq	0,006
Formación de partículas finas	kg PM _{2.5} eq	0,011
Formación de ozono, ecosistemas terrestres	kg NO _x eq	0,006
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	0,006
Eutrofización de agua dulce	kg P eq	0,001
Eutrofización marina	kg N eq	3,80E-05
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB	2,30
Ecotoxicidad del agua dulce	kg 1,4-DCB	0,02

Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DCB	0,03
Toxicidad carcinogénica humana	kg 1,4-DCB	0,05
Toxicidad humana no cancerígena	kg 1,4-DCB	0,80
Uso del suelo	m ² a crop eq	0,98
Escasez de recursos minerales	kg Cu eq	0,001
Escasez de recursos fósiles	kg oil eq	0,28
Consumo de agua	m ³	0,002

Tabla 20. Resultado de normalización las categorías de impacto del proceso global.

Categoría de impacto	Producción de 1kg de pellet
Calentamiento global	0,00012522
Agotamiento del ozono estratosférico	9,86E-06
Radiación ionizante	3,04E-05
Formación de ozono, Salud humana	0,0002677
Formación de partículas finas	0,0004149
Formación de ozono, ecosistemas terrestres	0,00031237
Acidificación terrestre	0,000139
Eutrofización de agua dulce	0,00092653
Eutrofización marina	8,24E-06
Ecotoxicidad terrestre	0,00221868
Ecotoxicidad del agua dulce	0,01968584
Ecotoxicidad marina	0,03340375
Toxicidad carcinogénica humana	0,01769066
Toxicidad humana no cancerígena	0,00533934
Uso del suelo	0,00015902
Escasez de recursos minerales	9,70E-09
Escasez de recursos fósiles	0,00028501
Consumo de agua	9,20E-06

Análisis de red obtenido del software SimaPro del proceso de producción de pellet, mostrando la caracterización de impacto del calentamiento global (kg de CO₂ equivalentes).

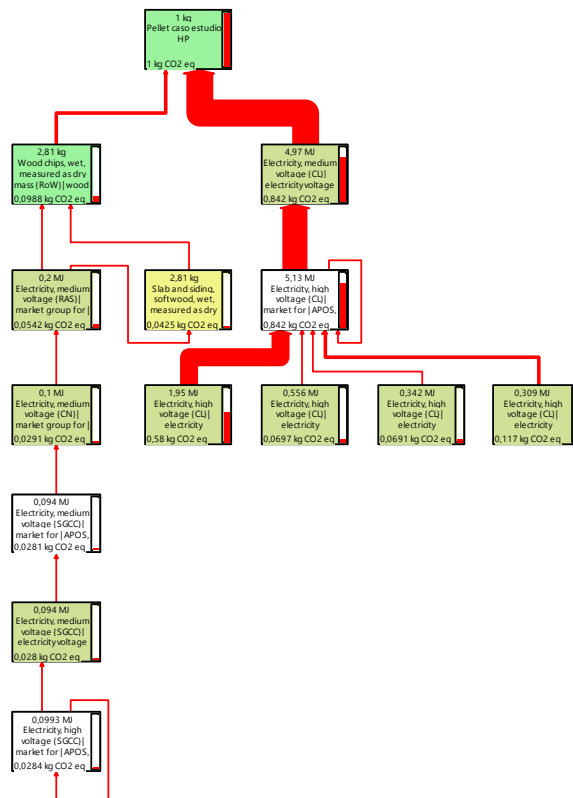


Figura 10. Análisis de Red caracterización de calentamiento global como impacto.

2. Resultados de las categorías de impacto mas relevantes en el proceso global.

Tabla 21. Resultado de las categorías de impacto relevantes del proceso global en relación a los subsistemas.

Categoría	CG	AO	FPF	AT	EAD	EM	EF
	kg CO ₂ eq	kg CFC11 eq	kg PM.5 eq	kg SO ₂ eq	kg P eq	kg N eq	kg oil eq
Total	1,00	5,90E-07	0,011	0,006	0,001	3,80E-05	0,28
Subsistemas	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Producción materia prima	9,8%	7,8%	2%	6,2%	7,1%	8,6%	9,4%
Fabrica de pellet de madera (infraestructura)	1,6%	2,2%	0,5%	1,9%	3,1%	3,8%	1,3%
Transporte	2,5%	1,9%	0,3%	1,3%	0,3%	0,4%	3,3%
Producción de pellet (electricidad)	84,2%	59,1%	94,2%	81,2%	88,9%	86,3%	84,4%
Otros	1,9 %	29%	3%	9,4%	0,6%	0,9%	1,6%

*Calentamiento global (CG), agotamiento del ozono (AO), Formación de partículas fina (FPF), Acidificación terrestre (AT), eutrofización de agua dulce (EAD), eutrofización marina (EM), escasez de recursos fósiles (EF).

3. Resultados de categorías de impacto de la comparación de las operaciones unitarias del proceso.

Se realizó una comparación de las etapas de producción, tamizado primario, secado, molienda, pelletizado, enfriado y harneo, añadiendo el transporte de la materia prima. En la tabla 22 se muestran los resultados de la caracterización de las categorías de impacto por etapas.

Tabla 22. Resultado de caracterización de las categorías de impacto mediante comparación de etapas del proceso.

Categoría de impacto	Unidad	Transporte materia prima	Tamizado primario	Secado	Molienda	Pelletizado	Enfriado	Harneo
Calentamiento global	kg CO ₂ eq	0,046215608	0,038172234	0,25484486	0,40983597	0,70060598	0,14511567	0,153253
Agotamiento del ozono estratosférico	kg CFC11 eq	1,99E-08	1,68E-08	3,80E-07	2,51E-07	3,76E-07	1,18E-07	1,24E-07
Radiación ionizante	kq Co-60 eq	0,003455932	0,004363464	0,016494323	0,010862206	0,012126635	0,009245995	0,009764462
Formación de ozono, Salud humana	kg NO _x eq	0,000154549	0,000116681	0,002036714	0,001767621	0,003034412	0,00044106	0,000465792
Formación de partículas finas	kg PM2.5 eq	8,91E-05	7,81E-05	0,001358848	0,003170068	0,006601964	0,000376928	0,000398064
Formación de ozono, ecosistemas terrestres	kg NO _x eq	0,000158911	0,000120107	0,002088121	0,001837456	0,003112276	0,000455445	0,000480984
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	0,000160604	0,000136352	0,001536325	0,00207794	0,00366852	0,000553126	0,000584143
Eutrofización de agua dulce	kg P eq	1,54E-05	1,53E-05	9,44E-05	0,000194773	0,000379692	5,58E-05	5,89E-05
Eutrofización marina	kg N eq	1,18E-06	1,19E-06	7,54E-06	1,42E-05	2,56E-05	2,15E-05	2,27E-05
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB	0,21157403	0,055358505	1,2621923	0,9482393	1,2286379	0,3392381	0,3582608
Ecotoxicidad del agua dulce	kg 1,4-DCB	0,000868933	0,000788726	0,007467385	0,00915934	0,015090442	0,00319775	0,003377063
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DCB	0,001278024	0,00109472	0,010764367	0,013097386	0,021466135	0,004468683	0,004719263
Toxicidad carcinogénica humana	kg 1,4-DCB	0,001869354	0,001753093	0,012532234	0,01892175	0,032666246	0,005778785	0,006102829
Toxicidad humana no cancerígena	kg 1,4-DCB	0,023439229	0,019648304	0,33996345	0,29457644	0,46501604	0,089362218	0,094373183
Uso del suelo	m ² a crop eq	0,25139733	0,25346335	1,2035802	0,49690688	0,51183556	0,51620755	0,54515377
Escasez de recursos minerales	kg Cu eq	8,29E-05	7,13E-05	0,00057962	0,00051332	0,00060823	0,000264656	0,000279496
Escasez de recursos fósiles	kg oil eq	0,012596146	0,009648874	0,0690427	0,12214223	0,20334496	0,038458507	0,040615058
Consumo de agua	m ³	0,000227832	0,00023257	0,002622369	0,00461358	0,005254005	0,000928279	0,000980332

Anexo E: Resultados numéricos de la comparación entre diferentes producciones de combustibles numéricos obtenidos del Software SimaPro.

1. Resultado de datos numéricos de la comparación de combustibles.

Tabla 23.Resultados comparación de combustibles

Categoría de impacto	Unidad	Pellets internacional	Gas Licuado	Diésel	Carbón	Pellet Caso estudio
Calentamiento global	kg CO2 eq	0,007765938	0,006937069	0,011430871	0,066857369	0,058500304
Agotamiento del ozono estratosférico	kg CFC11 eq	6,40E-09	9,51E-09	1,93E-08	5,29E-09	4,20E-08
Radiación ionizante	kq Co-60 eq	0,000512698	0,000416101	0,000795537	0,000430975	0,001745789
Formación de ozono, Salud humana	kg NOx eq	2,32E-05	2,08E-05	3,91E-05	8,82E-05	0,000326158
Formación de partículas finas	kg PM2.5 eq	1,74E-05	1,84E-05	3,30E-05	3,87E-05	0,000588381
Formación de ozono, ecosistemas terrestres	kg NOx eq	2,40E-05	2,21E-05	4,17E-05	0,000116551	0,000330872
Acidificación terrestre	kg SO2 eq	2,91E-05	5,28E-05	9,65E-05	4,89E-05	0,000329744
Eutrofización de agua dulce	kg P eq	2,91E-06	7,05E-07	1,08E-06	3,01E-06	3,34E-05
Eutrofización marina	kg N eq	1,18E-06	9,14E-08	1,62E-07	3,10E-07	2,20E-06
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB	0,018578153	0,007997234	0,01228095	0,036450754	0,14598481
Ecotoxicidad del agua dulce	kg 1,4-DCB	0,000171638	5,16E-05	8,63E-05	0,000173351	0,001577104
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DCB	0,000239779	9,11E-05	0,000158745	0,000254808	0,002205232
Toxicidad carcinogénica humana	kg 1,4-DCB	0,000307029	0,000112726	0,000202074	0,000315906	0,002819881
Toxicidad humana no cancerígena	kg 1,4-DCB	0,004792604	0,001606119	0,002752456	0,005170324	0,049484376
Uso del suelo	m2a crop eq	0,028680138	5,10E-05	9,61E-05	0,083967934	0,066110746
Escasez de recursos minerales	kg Cu eq	1,46E-05	8,58E-06	1,58E-05	1,38E-05	5,08E-05
Escasez de recursos fósiles	kg oil eq	0,00205411	0,012955636	0,026712611	0,003197519	0,016362326
Consumo de agua	m3	5,10E-05	6,57E-05	0,000126374	0,000811551	0,000258207

