



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
INGENIERIA FORESTAL

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA PARA EL PROCESO DE MANUFACTURA DE
TABLEROS DE FIBRA DE DENSIDAD MEDIA (MDF) EN PLANTA
CHOLGUÁN**

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de
Concepción para optar al título profesional de Ingeniera Forestal

POR: Belén Noemí Moya Navarrete

Profesor Guía: Rafael Alejandro Rubilar Pons

Julio, 2024

Concepción, Chile

© 2024, Belén Noemí Moya Navarrete

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA PARA EL PROCESO DE MANUFACTURA DE
TABLEROS DE FIBRA DE DENSIDAD MEDIA (MDF) EN PLANTA
CHOLGUÁN**

Profesor Guía



Rafael Alejandro Rubilar Pons

Profesor Titular

Ingeniero Forestal, PhD



Profesor Guía

Rosa María Alzamora Mallea

Profesora Asociada

Ingeniera Forestal, PhD.

DEDICATORIA

A mi madre, qué manera de dejar la vara alta.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, en especial a mi hermanita Martina, gracias por acompañarme todo este tiempo siendo foráneas. A José Tomás Jofré Orellana, por la calidez de su abrazo en momentos difíciles. A mis amigos, en especial a Dariel Abaca, el primer amigo que hice en la facultad. A mis amigos del LSTM y LISAB: Diego Torres, Paula Soto, Jane Silva y Oscar Jara. Y a mis profesores guías, Rafael Rubilar y Rosa Alzamora. Gracias a todos por enseñarme con tanta dedicación y cariño.

TABLA DE CONTENIDOS

I. INTRODUCCIÓN	1
II. METODOLOGÍA.....	8
2.1. Caso de estudio.....	8
2.1.1. Planta Cholguán	8
2.2. Manufactura MDF	10
2.2.1. Preparación de fibras	12
2.2.2. Línea de Formación.....	13
2.2.3. Línea de terminación	13
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	22
3.1. Evaluación de impacto de ciclo de vida: preparación de fibras	26
3.2. Evaluación de impacto de ciclo de vida: línea de formación.....	28
3.3. Evaluación de impacto de ciclo de vida: línea de terminación.....	30
3.4. Análisis de resultados en contextos internacionales	32
IV. CONCLUSIONES.....	35
V. GLOSARIO.....	37
VI. BIBLIOGRAFÍA	40
VII. APÉNDICE	44
7.1. Apéndice A	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Propiedades de un metro cúbico (1 m^3) de tablero MDF. Fuente: Ecoinvent.	16
Tabla 2.2. Inventario de entradas para la producción de un metro cúbico (1 m^3) de MDF.	18
Tabla 2.3. Inventario de salidas para la producción de un metro cúbico (1 m^3) de MDF.	20
Tabla 3.1. Resultados de la evaluación de ciclo de vida asociada a la producción de un metro cúbico (1 m^3) de tablero MDF. Incluye los subsistemas de preparación de fibras, línea de formación y línea de terminación.....	26
Tabla 3. 2. Indicadores de impacto ambiental por categoría en el análisis de ciclo de vida de un metro cúbico (1 m^3) de tablero MDF: comparativa entre países....	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Proceso de manufactura del MDF. Fuente: Arauco.	11
Figura 2.2. Frontera del sistema del proceso de manufactura del tablero MDF. Fuente: elaboración propia.	17
Figura 3.1. Contribución relativa (%) al perfil ambiental de los subsistemas involucrados en el ciclo de vida de la producción de un metro cúbico (1 m ³) de tablero MDF. Incluye los subsistemas de preparación de fibras, línea de formación y línea de terminación.....	23
Figura 3.2. Contribución relativa (%) al perfil medioambiental del subsistema de preparación de fibras para la producción de un metro cúbico (1 m ³) de tablero MDF.	27
Figura 3.3. Contribución relativa (%) al perfil medioambiental del subsistema de línea de formación para la producción de un metro cúbico (1 m ³) de tablero MDF.	29
Figura 3.4. Contribución relativa (%) al perfil medioambiental del subsistema de línea de terminación para la producción de un metro cúbico (1 m ³) de tablero MDF.	31

RESUMEN

Este estudio aborda la interrelación entre el consumo de energía y las emisiones relacionadas al proceso de manufactura de un metro cúbico (1 m^3) de tablero de fibra de densidad media (MDF) en una planta de manufactura chilena a través de un análisis de ciclo de vida (ACV). El estudio siguió las directrices de la normativa ISO 14040 e ISO 14044, que determinan los principios y la estructura del ACV. Los escenarios de manufactura del MDF fueron modelados utilizando el software SimaPro v8.8. El perfil medioambiental se analizó utilizando el método ReCiPe Midpoint (H), versión 1.06, considerando once categorías de impacto: acidificación terrestre, agotamiento de fósiles, agotamiento de la capa de ozono, cambio climático, ecotoxicidad en agua dulce, ecotoxicidad marina y terrestre, eutrofización del agua dulce, formación de material particulado, formación de oxidantes fotoquímicos y toxicidad humana. Están incluidas en tres subsistemas del proceso de fabricación: preparación de fibras, línea de formación y línea de terminación. El subsistema de preparación de fibras presentó las emisiones más altas, contribuyendo con un 75% de las emisiones, identificándose la producción de resina urea-formaldehído como un punto crítico. Otras contribuciones significativas provienen de la generación de electricidad, con alrededor de un 44,9%. Por otro lado, el transporte de materias primas presentó las contribuciones más bajas, con un 1,4%.

ABSTRACT

This study addresses the interrelationship between energy consumption and emissions related to the manufacturing process of one cubic meter of medium density fiberboard (MDF) in a Chilean manufacturing plant, through a life cycle analysis (LCA). The study followed the guidelines of ISO 14040 and ISO 14044, which determine the principles and framework of LCA. The MDF manufacturing scenarios were modeled using SimaPro v8.8 software. The environmental profile was analyzed using the ReCiPe Midpoint (H) method, version 1.06, considering eleven impact categories: terrestrial acidification, fossil depletion, ozone depletion, climate change, freshwater ecotoxicity, marine and terrestrial ecotoxicity, freshwater eutrophication, particulate matter formation, photochemical oxidant formation and human toxicity. These categories are analyzed across three subsystems of the manufacturing process: fiber preparation, forming line and finishing line. The fiber preparation subsystem presented the highest emissions, contributing 75% of the emissions, with the production of urea-formaldehyde resin identified as a critical point. Other significant contributions came from electricity generation, with about 44,9%. In contrast, the transportation of raw materials presented the lowest contributions, with 1,4%.

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación y degradación del medio ambiente es un problema vinculado, entre otros, al ciclo de vida de los materiales que son usados en innumerables procesos productivos y que comprende procesos de: generación, uso y degradación (Niembro, 2008). En la transición hacia prácticas sostenibles, la evaluación de las cargas ambientales ha experimentado una evolución significativa. Anteriormente centrada en considerar únicamente los impactos específicos de un sitio, la evaluación ahora integra los impactos de productos específicos, sus procesos de fabricación y su uso (Heroux, 2023).

En la actualidad los materiales de construcción se someten a un nivel de transparencia que va mucho más allá de sus atributos naturales, ya que deben presentar un bajo contenido de carbono y energía incorporados, mientras aún conservan sus atributos funcionales como el rendimiento estructural, la facilidad de instalación y durabilidad. Para los usuarios de este tipo de materiales, los estudios cuantitativos que validan los atributos medioambientales del producto son esenciales. Un enfoque clave para la realización de este tipo de evaluaciones es el análisis de ciclo de vida (ACV).

El análisis de ciclo de vida es una metodología sistemática para evaluar y cuantificar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final (Gregory & Olivetti, 2024). Las metodologías de ACV surgieron a finales de la década de 1960 (Jensen et al., 1997; Guinée et al., 2011) y actualmente consideran estándares europeos como la norma ISO 14044 de 2006 y la norma ISO 14040 de 2009, las cuales han permitido la implementación estandarizada y eficiente de los ACV para las industrias y procesos productivos que lo requieran.

De acuerdo con la Organización Internacional de Normalización (ISO, 2006a-b), el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se estructura en cuatro etapas: definición del objetivo y alcance, inventario de ciclo de vida (ICV), evaluación del impacto de ciclo de vida (EICV) e interpretación. Los objetivos y el propósito del estudio condicionan los resultados de cada etapa, las cuales están interrelacionadas entre sí. Las cuatro fases fundamentales para su desarrollo según la normativa europea actual:

- Definición del objetivo y alcance: se enfoca en formular la pregunta de investigación y aplicar la respuesta prevista que el estudio de ACV debe proporcionar (Heijungs & Suh, 2002). También se incluyen los límites del sistema, la unidad funcional, los flujos de materia y energía a lo largo del ciclo de vida, y las categorías de impacto ambiental analizadas

- Análisis de inventario (ICV): divide el sistema inicial en varios subsistemas y son determinados los flujos de referencia para materias o procesos considerados en cada subsistema.
- Evaluación de impacto (EICV): Los impactos ambientales para cada flujo se evalúan a partir del análisis de inventario. En la etapa final, se asigna una puntuación específica a cada categoría de impacto tras determinar cómo un factor particular caracteriza su impacto. En esta fase también se puede aplicar la normalización (Zampori et al., 2016).
- Interpretación: Son analizados los resultados, conclusiones, análisis de sensibilidad e incertidumbre.

Posterior a esto, los efectos particulares de los procesos y productos pueden examinarse a través de categorías de impacto. Cada categoría brinda una perspectiva sobre los diversos tipos de impactos que ocurren a lo largo del ciclo de vida; esto facilita la identificación de áreas cruciales y la implementación de estrategias de mitigación (Guinée et al., 2011; IPCC, 2013). Las categorías de impacto que se han evaluado en el documento son:

- Acidificación Terrestre: Analiza el potencial de acidificación del suelo como resultado de la emisión de óxidos de azufre (SO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x), los cuales contribuyen a la acidificación del suelo y la degradación de los ecosistemas terrestres (Guinée et al., 2011). Medido en kilogramos de dióxido de azufre equivalentes ($\text{kg SO}_2 \text{ eq}$).

- Agotamiento de Fósiles: Analiza el impacto de la extracción y uso de combustibles fósiles que afectan los recursos no renovables; afectando la disponibilidad futura de estos recursos (Ecoinvent, 2020). Medido en kilogramos de petróleo equivalente (kg oil eq).
- Agotamiento de la Capa de Ozono: Analiza el potencial de los compuestos químicos para deteriorar la capa de ozono estratosférico, esencial para proteger la vida terrestre de la radiación ultravioleta (UNEP, 2018). Medido en kilogramos CFC-11 equivalentes (kg CFC-11 eq).
- Cambio Climático: Calcula el impacto de las emisiones de gases de efecto invernadero, como CO₂ y CH₄, en el calentamiento global y sus efectos asociados en el clima (IPCC, 2013). Medido en kilogramos de dióxido de carbono equivalentes (kg CO₂ eq).
- Ecotoxicidad en Agua Dulce: Analiza como los contaminantes químicos afectan la salud los ecosistemas acuáticos de agua dulce, (Jolliet et al., 2015). Medido en kilogramos de equivalentes 1,4 diclorobenceno (kg 1,4 DB eq).
- Ecotoxicidad Marina y Terrestre: Analiza la toxicidad de los contaminantes en ecosistemas marinos y terrestres, considerando la bioacumulación y la toxicidad a organismos (Heijungs et al., 2010). Medido en kilogramos de equivalentes 1,4 diclorobenceno (kg 1,4-DB eq).
- Eutrofización del Agua Dulce: Evalúa el efecto de nutrientes como fósforo y nitrógeno, los cuales provocan un aumento excesivo de algas en cuerpos de

agua dulce, alterando la calidad del agua y la vida acuática (Vollenweider, 1968).

Se determina en kilogramos de fósforo equivalente (kg P eq).

- Formación de Material Particulado: Mide la contribución de las emisiones de partículas en el aire, que afectan en la salud humana y la calidad del aire (Cohen et al., 2005). Medido en kilogramos equivalentes en partículas PM 10 (kg PM 10 eq).

- Formación de Oxidantes Fotoquímicos: Evalúa el impacto de las emisiones óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles (COV) en la formación de ozono troposférico y smog fotoquímico (Derwent et al., 2005). Medido en kilogramos de compuestos orgánicos volátiles no metánicos (kg NMVOC).

- Toxicidad Humana: Estudia como las sustancias químicas afectan en la salud humana, considerando la exposición y los efectos adversos sobre la salud (Finkbeiner et al., 2006). Medido en kilogramos de equivalentes en 1,4 diclorobenceno (kg 1,4-DB eq).

En cuanto a la mitigación de los efectos ambientales y gestión sostenible de los recursos, la industria de tableros y chapas en Chile enfrenta desafíos importantes, según el reciente informe del Instituto Forestal (Soto et al., 2022). La alta demanda y la constante innovación en procesos y tecnologías que maximizan su eficiencia y sostenibilidad han impulsado el crecimiento sostenido de la industria, esencial para los sectores de construcción y el mobiliario. El tablero de fibra de densidad media (MDF), en particular, es un componente

fundamental para la creación de revestimientos, muebles y aplicaciones en la construcción.

Aproximadamente el 33.3% de la producción nacional de tableros MDF fue destinada a mercados internacionales en 2021. En los últimos años, debido a un aumento en la demanda del mercado interno, esta proporción ha disminuido. La distribución de la producción entre el mercado interno y las exportaciones fue cercana al 50% entre 2013 y 2014, lo que indicaba un equilibrio uniforme entre ambos destinos (Soto et al., 2022). Esta tendencia evidencia una mayor concentración de la producción en el mercado local, mientras que la participación en mercados externos ha reducido su cuota.

Dada la importancia del MDF en el territorio nacional, la aplicación del ACV resulta crucial para evaluar y optimizar el proceso de manufactura. Este enfoque metodológico, aplicado al proceso de elaboración del MDF permitiría la identificación de oportunidades para la reducción del consumo de recursos, las emisiones y la optimización de la eficiencia energética asociada al proceso de producción (González-García et al., 2009; Cederberg et al., 2009).

De esta manera, el objetivo de este estudio fue desarrollar un análisis del impacto medioambiental asociado con el proceso de manufactura de tableros MDF. El análisis busca comprender mejor los efectos medioambientales asociados y

examinar estrategias para mitigar estos impactos, adaptándose al nuevo escenario de cambio climático y contribuyendo a la sostenibilidad en la fabricación de MDF. Bajo este contexto, el principal objetivo de este estudio fue caracterizar el impacto ambiental asociado con el proceso de manufactura del tablero MDF producido por la planta Cholguán de Maderas Arauco S.A. Para lograr este objetivo, se consideró desarrollar un análisis de ciclo de vida (ACV) del proceso productivo del tablero MDF. De esta manera los objetivos específicos considerados fueron: 1) delimitar el alcance del análisis de ciclo de vida, definiendo los límites del sistema, las unidades funcionales y los procesos incluidos; 2) realizar un inventario de ciclo de vida para recopilar y cuantificar las entradas y salidas del sistema de producción, incluyendo materias primas, energía, emisiones y residuos; 3) evaluar el impacto ambiental transformando los datos del inventario de ciclo de vida en indicadores ambientales mediante metodologías de caracterización, y 4) interpretar los resultados obtenidos en función del objetivo general, identificando puntos críticos y proponiendo recomendaciones para la mejora ambiental del proceso productivo del tablero MDF.

II. METODOLOGÍA

2.1. Caso de estudio

El caso de estudio abordó la interrelación entre el consumo de energía y las emisiones asociadas al proceso de manufactura de un metro cúbico (1 m^3) de tablero MDF en la planta Cholguán, mediante un ACV. Los escenarios de manufactura del MDF fueron modelados utilizando el software SimaPro v8.8. El perfil medioambiental se analizó en función de once categorías de impacto. A continuación, se describe el proceso de producción industrial.

2.1.1. Planta Cholguán

En el complejo Cholguán se encuentran dos líneas de producción de tableros MDF. Línea 1, construida en 1987, que tiene una capacidad de producción anual de 120 mil metros cúbicos. La línea 2, establecida en 2002, cuenta con una capacidad anual de 320 mil metros cúbicos de tableros. Este estudio, en particular, está enfocado en la evaluación medioambiental de la producción de tableros MDF de la línea 2.

En términos energéticos, Cholgúan tiene dos plantas de energía que proveen energía térmica y eléctrica a las líneas de producción. La planta de energía, vigente desde el 2001, es la encargada de suministrar vapor (línea 2) y electricidad a las líneas de producción, asegurando un suministro constante de energía. La planta opera mediante cuatro componentes principales: una caldera que genera vapor a partir de la combustión de combustibles, un turbogenerador que convierte el vapor en energía mecánica, un sistema de vapor que distribuye y controla el vapor producido, y un sistema eléctrico que gestiona la generación y distribución de energía eléctrica para alimentar las diversas operaciones de la planta.

Por otro lado, la planta térmica se encarga de suministrar vapor y gases calientes a la línea 1 para la producción de tableros mediante la combustión de biomasa húmeda proveniente de desechos generados en la planta. Es también responsable de generar la energía térmica utilizada para la línea dos. La que entrega un vapor saturado de 4.5, 15 y 36 bares.

La Línea 2 actualmente tiene una producción anual de 230.000 m³ de cuatro tipos de productos: estándar, liviano, ultraliviano y delgado. Los productos más fabricados son los ultra-livianos de 15-12-18 mm seguido por los livianos de 18-9-15 mm.

La materia prima para la construcción de tableros corresponde a madera de pino (*Pinus radiata* D. Don), que empleada en la producción del tablero MDF presenta una densidad relativa de 500-600 kg/m³ y un contenido de humedad que varía entre 7% y 8%. Su estructura morfológica, caracterizada por fibras largas y rectas, proporciona estabilidad y resistencia mecánica. Contiene 40- 45% de celulosa, 25-30% de hemicelulosa y 20-25% de lignina, componentes que contribuyen a la rigidez mecánica y resistencia a la deformación del MDF (Forest Products Laboratory, 2010).

2.2. Manufactura MDF

El proceso de manufactura del MDF (Figura 2.1) comienza con la materia prima sometida a un proceso de descortezado, seguido de astillado y cribado para obtener chips de tamaño homogéneo. Posteriormente, los chips son almacenados temporalmente en silos o pilas.

La siguiente etapa es el desfibrado, donde las fibras de madera se separan y refinan. Al finalizar el desfibrado, se incorporan adhesivos, parafina y biocidas a las fibras, asegurando una distribución uniforme de estos aditivos.

Las fibras tratadas se configuran en un manto continuo que es luego sometido a un proceso de prensado en caliente, aplicando condiciones precisas de temperatura y presión para lograr la polimerización del adhesivo y conferir las

propiedades mecánicas y físicas específicas del tablero MDF. Tras un periodo de reposo para estabilización en el sistema de almacenamiento Lukki, los tableros son sometidos a un proceso de lijado en ambas caras y formateados en las dimensiones especificadas según los requisitos del cliente.

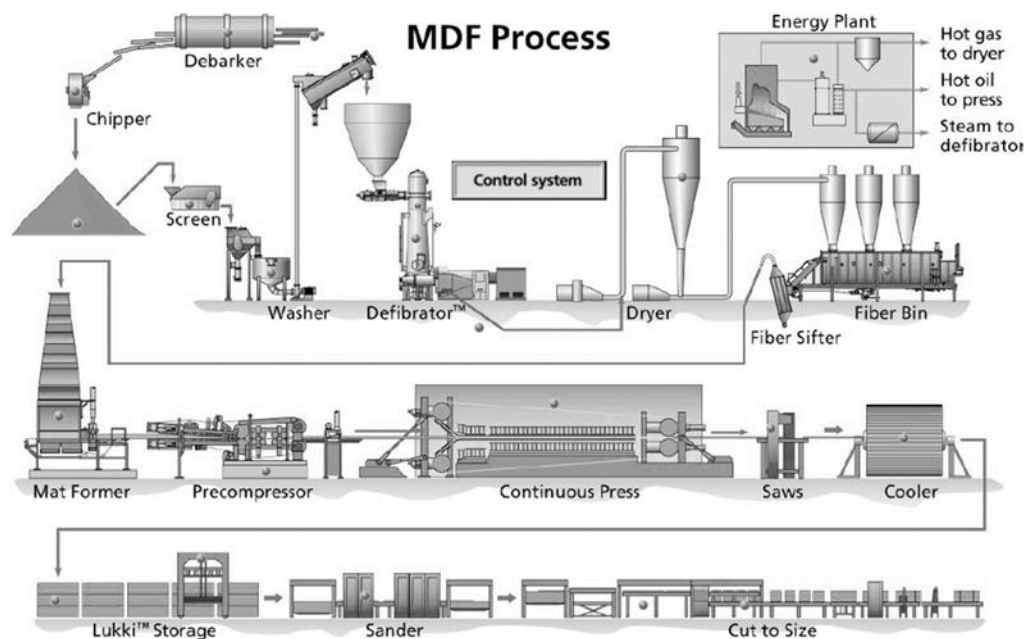


Figura 2.1. Proceso de manufactura del MDF. Fuente: Arauco.

El proceso de manufactura en la planta Cholguán se lleva a cabo en dieciséis fases, las cuales, como se describe en Rivela et al. (2007), fueron divididas en tres subsistemas: preparación de fibras, línea de formación y línea de terminación.

2.2.1. Preparación de fibras

El subsistema de preparación de fibras se inicia con el abastecimiento de materia prima, que incluye rollizos, astillas y aserrín, provenientes de plantaciones forestales de Arauco y proveedores externos. Las siguientes fases fueron consideradas para el subsistema:

- Descortezado: en esta etapa es eliminada la corteza de los rollizos de pino radiata para preparar la materia prima para las siguientes fases de procesamiento.
- Chipeado: la madera ya descortezada es convertida en pequeños chips o astillas mediante un chippeador, facilitando el manejo y posterior procesamiento.
- Cribado: los chips son separados según su tamaño por un tamiz o criba, para asegurar la consistencia de las partículas en la siguiente fase.
- Lavado: son eliminadas las impurezas y otros contaminantes de los chips mediante de un proceso de lavado con agua.
- Desfibrador: con el chip acondicionado, se procede a su desintegración en fibras individuales mediante un desfibrador, generando la materia prima fibrosa esencial para la fabricación del MDF. Durante esta fase, se inyecta la resina en las fibras para asegurar una distribución uniforme, lo que garantiza la adhesión y consolidación adecuadas del material en las etapas subsiguientes.
- Secado: posterior al desfibrado el contenido de humedad en las fibras es reducido mediante el proceso de secado, asegurando la eficiencia en la posterior etapa de formación y prensado del tablero.

2.2.2. Línea de Formación

En la línea de formación la fibra es distribuida de forma homogénea y compactada formando el manto continuo. Las siguientes fases fueron consideradas para el subsistema:

- Z-sifter: es el equipo de sistema que se encarga de la separación y clasificación de fibras según su tamaño y densidad, utilizando una serie tamices y vibraciones para asegurar la uniformidad del material antes de la formación.
- Formador MAT: este equipo distribuye y forma el manto continuo de fibras sobre la banda transportadora, compactando las fibras en una estructura homogénea para la etapa de prensado.
- Pre-compresor: dispositivo que precompacta el manto de fibras antes del prensado final, reduce el volumen y asegura una densidad uniforme en la mezcla de fibras.
- Prensado en caliente: en esta fase, la capa de fibra pre-comprimida se somete a un prensado final en caliente utilizando vapor. El calor y la presión en la prensa activan la resina, consolidando las fibras en un tablero sólido y uniforme. La planta de energía térmica es responsable de generar el vapor necesario para este proceso mediante la quema de chips de madera.

2.2.3. Línea de terminación

En la fase de terminación se realiza el corte según las dimensiones finales del producto, seguido de un enfriamiento controlado para estabilizar el producto

antes del lijado y el acabado. Las siguientes fases fueron consideradas para el subsistema:

- Corte y enfriamiento: se realiza el corte de los tableros MDF a las dimensiones especificadas y se procede al enfriamiento para estabilizar el material y reducir el riesgo de deformaciones.
- Sistema de almacenamiento Lukki: este sistema automatizado de almacenamiento que organiza y gestiona los tableros MDF cortados, facilitando el acceso y la eficiencia en el manejo de inventarios.
- Lijadora: se utiliza para el acabado superficial de los tableros MDF, mediante el pulido para obtener una superficie lisa y uniforme, mejorando la calidad del producto final.
- Formateo: ajuste y acabado final de los tableros MDF para cumplir con las especificaciones de tamaño y forma requeridas, se preparan los productos para su embalaje y distribución.

2.3. Alcance del análisis de ciclo de vida

Este estudio de ACV se realizó desde el enfoque “desde la cuna a la puerta” (Cradle to gate). En este tipo de enfoque los límites considerados incluyen desde las fases de extracción de materias primas, pasando por la producción y procesamiento de las fibras, hasta la fabricación y terminación del tablero MDF. Se consideraron los impactos asociados con el transporte y energía utilizada en cada etapa.

2.4. Metodología de evaluación de impacto

El análisis siguió las directrices de la normativa ISO 14040 e ISO 14044, que determinan los principios y la estructura del ACV. La evaluación de impacto ambiental se llevó a cabo utilizando el método ReCiPe Midpoint (H), versión 1.06 para la Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV) (Goedkoop et al., 2009). El método empleado se utilizó para comprender la complejidad de los impactos en el aire, el agua y los suelos para el escenario del proceso de manufactura del MDF.

En base al método de evaluación de impactos, el análisis de la producción de 1 m³ de tablero MDF consideró once categorías de impacto, acidificación terrestre (kg SO₂ eq), agotamiento de combustibles fósiles (kg oil eq), agotamiento de la capa de ozono (kg CFC-11 eq), cambio climático (kg CO₂ eq), ecotoxicidad en agua dulce (kg 1,4 DB eq), ecotoxicidad marina (kg 1,4 DB eq), ecotoxicidad terrestre (kg 1,4-DB eq), eutrofización de agua dulce (kg P eq), formación de material particulado (kg PM₁₀ eq), formación de oxidantes fotoquímicos (kg NMVOC) y toxicidad humana (kg 1.4-DB eq). Para todos los análisis se utilizó el software de ACV SimaPro v7.8 (Pre-Consultants, 2014) para construir el modelo de ACV y realizar los cálculos de evaluación de impacto.

2.5. Unidad funcional

Para el ICV, todos los flujos de materiales, combustibles y electricidad, así como los productos, coproductos, emisiones, fueron normalizados a la unidad funcional de un metro cúbico (1 m^3) de tablero MDF terminado. La elección de esta unidad funcional se llevó a cabo para facilitar la comparación con otros estudios y análisis en la literatura técnica (Chang et al., 2014). Un metro cúbico de MDF tiene las siguientes propiedades:

Tabla 2.1. Propiedades de un metro cúbico (1 m^3) de tablero MDF. Fuente: Ecoinvent.

Composición del MDF	Unidad	Valor
Densidad	kg/m^3	684
Contenido de humedad	%	7
Componente de madera	kg/m^3	546
Componente de resina	kg/m^3	93

En la Tabla 2.1 se muestran datos promedios del MDF. Debido a la alta variabilidad en los espesores y densidades de este tipo de producto, el uso de valores promedios simplifica los cálculos y permite una representación generalizada de las variaciones en la producción (Jolliet et al., 2003).

2.6. Frontera del sistema

La frontera definida para el sistema de estudio se presenta en la Figura 2. La frontera delimita los procesos de obtención de materias primas, químicos,

electricidad y transporte, finalizando con el tablero MDF terminado y sus emisiones correspondientes.

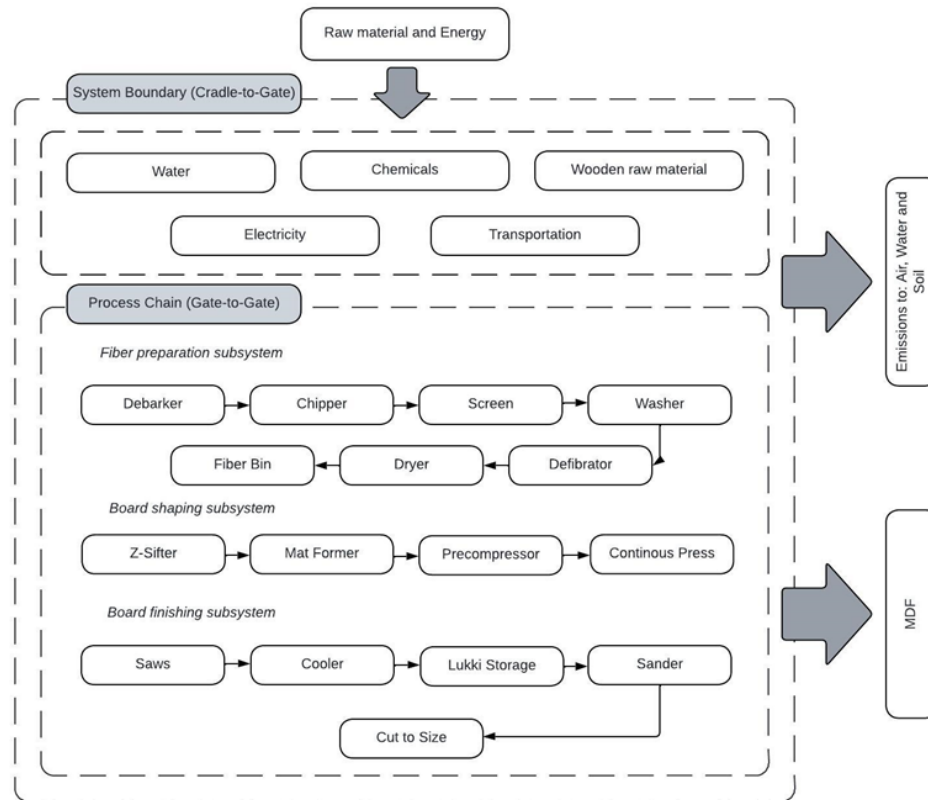


Figura 2.2. Frontera del sistema del proceso de manufactura del tablero MDF. Fuente: elaboración propia.

Fueron excluidos del análisis de frontera del sistema los equipos y las instalaciones de capital fijo, el uso de suelo, el mantenimiento, así como el uso y la disposición final del producto. Además, se excluyó del estudio la carga medioambiental asociada a la actividad humana involucrada para el proceso de manufactura del MDF.

2.7. Inventario de ciclo de vida (ICV)

La secuencia de la manufactura del MDF incorporó 3 subsistemas: preparación de fibras, línea de formación y línea de terminación. Para cada subsistema se utilizaron datos específicos sobre los recursos involucrados en la cadena de suministro para un metro cúbico (1 m^3) de tablero MDF.

Este estudio se fundamenta principalmente en los datos de producción y emisiones proporcionados por ARAUCO. La información referente al consumo de energía eléctrica y térmica se obtuvo del proveedor de maquinaria Valmet S.A. Adicionalmente, se incorporaron datos secundarios relacionados con combustibles e insumos provenientes de la red eléctrica del Sistema Interconectado Central chileno, así como de conjuntos de datos europeos de Ecoinvent. Para el transporte de materias primas, se utilizó una distancia promedio de 100 km, calculada a partir de la distancia entre el proveedor de madera y la planta Cholguán.

Tabla 2.2. Inventario de entradas para la producción de un metro cúbico (1 m^3) de MDF.

Entradas	Unidad	Unidad/ m^3	Fuente
Entradas desde la tecnosfera			
Madera	kg	546	Ecoinvent
Químicos			
Resina de urea formaldehído	kg	45.6	Ecoinvent
Resina de melamina formaldehído	kg	41.6	Ecoinvent
Sulfato de aluminio en polvo	kg	0.02	Ecoinvent

Urea	kg	0.69	Ecoinvent
Parafina	kg	4.63	Ecoinvent
Retardante de llama	kg	0.59	Ecoinvent
Colorante	kg	0.30	Ecoinvent
Energía eléctrica			
Subsistema de preparación de fibras	kWh	364.20	Valmet
Subsistema de línea de formación	kWh	47.27	Valmet
Subsistema de línea de terminación	kWh	42.97	Valmet
Total	kWh	454.44	Valmet
Energía térmica			
Subsistema de línea de formación - Prensa continua	MJ	355.64	Valmet
Transporte (t/km)			
Camión Diesel	tkm	54.6	Ecoinvent
Entradas desde el medio ambiente			
Agua	L	44.40	Ecoinvent

Para complementar la data de las emisiones atmosféricas asociadas a la producción de 1 m³ de tablero MDF, se emplearon datos provenientes de un estudio similar hecho en Brasil, que resulta ser comparable a nuestro estudio por las características de producción, materia prima y gastos energéticos en general (Piekarski et al., 2017). Esta referencia proporcionó una base analítica sólida para la cuantificación de las emisiones, permitiendo una evaluación precisa del impacto ambiental en concordancia con los datos obtenidos en el presente análisis (Tabla 2.3).

Tabla 2.3. Inventario de salidas para la producción de un metro cúbico (1 m³) de MDF.

Salidas a la tecnosfera	Unidad	Unidad/m ³	Fuente
Tablero de fibra de densidad media (MDF)	kg	684	Ecoinvent
Residuos (Polvo de sierra, etc.)	kg	25	Valmet
Salidas a la atmósfera			
Dióxido de carbono, CO ₂ (fossil)	kg	33.5	Piekarski, Cassiano Moro, et al.
Monóxido de carbono CO (fossil)	kg	4.5	Piekarski, Cassiano Moro, et al.
Óxidos de nitrógeno, Nox	kg	1.26	Piekarski, Cassiano Moro, et al.
Compuestos orgánicos volátiles (VOCs), sin CH ₄	kg	1.11	Piekarski, Cassiano Moro, et al. (2017)
Partículas (inespecíficas)	kg	0.6	Piekarski, Cassiano Moro, et al. (2017)
Formaldehído, H ₂ CO	kg	0.12	Piekarski, Cassiano Moro, et al. (2017)
Ácido sulfúrico, H ₂ SO ₄	kg	0.12	Piekarski, Cassiano Moro, et al. (2017)
Dióxido de azufre, SO ₂	kg	0.04	Piekarski, Cassiano Moro, et al. (2017)

2.8. Asignación

En este estudio no fue aplicada la asignación de impactos ambientales. El proceso de manufactura del MDF fue analizado como un sistema integral. En el caso de los residuos de los procesos analizados, estos no tienen asignación de carga ambiental al ser reincorporados al sistema como materia prima o combustible (Rivela et al., 2007).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este estudio se realizó con el objetivo de determinar las cargas ambientales, identificar los puntos críticos, y proporcionar datos completos del Inventario de Ciclo de Vida (ICV) de la fabricación de MDF en la planta Cholguán. En la Tabla 3.1 se presentan los resultados de la comparación de los subsistemas, basada en la contribución relativa de cada uno a la producción de 1 m³ de MDF. Asimismo, la Figura 3.1 ilustra la contribución relativa de cada etapa del proceso de fabricación en cada categoría de impacto ambiental. Esto permite identificar qué fase o componente es el mayor contribuyente para cada tipo de impacto.

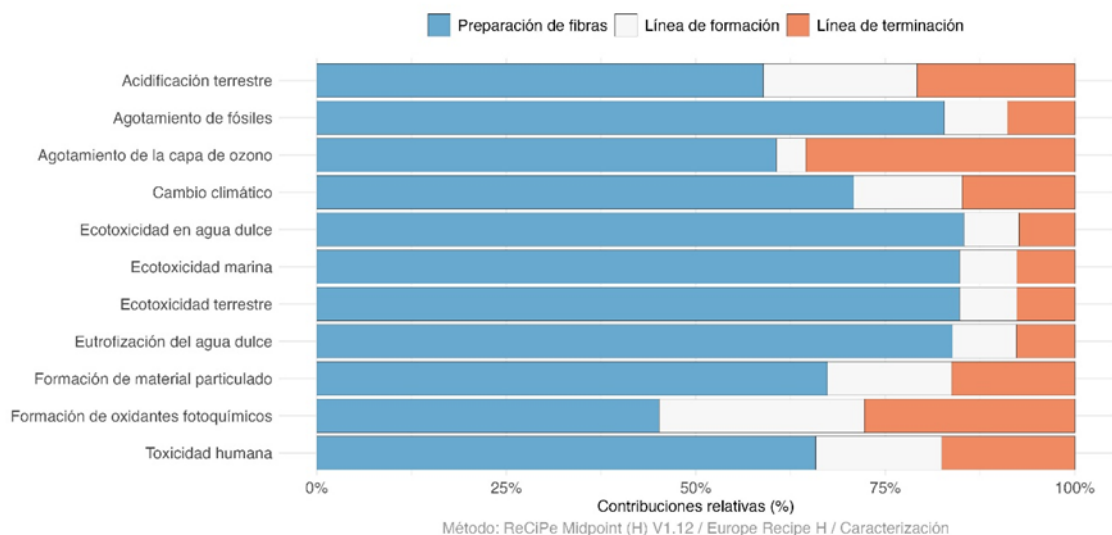


Figura 3.1. Contribución relativa (%) al perfil ambiental de los subsistemas involucrados en el ciclo de vida de la producción de un metro cúbico (1 m³) de tablero MDF. Incluye los subsistemas de preparación de fibras, línea de formación y línea de terminación.

En términos generales, el subsistema de preparación de fibras resultó ser el subsistema que presentó las mayores contribuciones al perfil medioambiental aportando especialmente en la ecotoxicidad terrestre y marina, y en la toxicidad humana. Este subsistema involucra una mayor cantidad de equipos especializados en comparación con los demás subsistemas. El consumo energético de estas maquinarias, como el desfibrador, es considerablemente elevado debido a su operación intensiva. Por otro lado, los adhesivos de urea-formaldehído utilizados en este proceso resultan contaminantes. Guler y Karahan (2020) discuten cómo los adhesivos a base de urea-formaldehído, comúnmente utilizados en la producción de tableros de MDF, liberan formaldehído, un

compuesto orgánico volátil (COV) asociado con efectos adversos para la salud humana y el medio ambiente. La emisión de formaldehído contribuye a la formación de smog fotoquímico resultando ser un factor significativo en la evaluación del impacto ambiental del ciclo de vida del MDF.

En el caso de el subsistema de línea de formación, a pesar de su complejidad, presenta bajas emisiones debido a la eficiencia del prensado en caliente y el uso de sistemas de reciclaje de aire y gases. Gupta y Hu (2017) destacan que la tecnología moderna en la prensa y el control avanzado de emisiones contribuyen significativamente a minimizar las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV) y otras partículas contaminantes durante la formación del tablero. En este subsistema, el prensado en caliente se realiza mediante vapor generado a partir de una planta de energía térmica. Este método contribuye a la eficiencia del proceso y minimiza el impacto energético en comparación con otras fases. El uso de vapor en el prensado es clave para reducir las emisiones y el consumo energético durante la formación del tablero MDF (Kärki & Rautakoski, 2019).

La línea de terminación es el proceso de fabricación que presenta mayores emisiones en comparación con la línea de formación debido a varias razones técnicas. Primero, la línea de terminación incluye equipos como las sierras de corte y el sistema Lukki de almacenamiento, que requieren un consumo energético considerable, incrementando así las emisiones de CO₂ eq (Chang,

Lee, & Chen, 2014). Segundo, el proceso de lijado, necesario para obtener un acabado superficial uniforme, contribuye significativamente a la formación de material particulado y emisiones de compuestos orgánicos volátiles (Smith et al., 2018). En contraste, la línea de formación, aunque consume energía durante el prensado en caliente, utiliza vapor generado en plantas de energía térmica, lo que tiende a ser menos intensivo en emisiones directas comparado con el consumo de energía eléctrica en la línea de terminación (Wilson et al., 2016).

Tabla 3.1. Resultados de la evaluación de ciclo de vida asociada a la producción de un metro cúbico (1 m³) de tablero MDF. Incluye los subsistemas de preparación de fibras, línea de formación y línea de terminación.

Categorías de impacto	Unidad	Preparación de fibras	Línea de formación	Línea de terminación
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	3.31	1.14	1.17
Agotamiento de fósiles	kg oil eq	169	17	18.2
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC-11 eq	3.45E-05	2.22E-06	2.02E-05
Cambio climático	kg CO ₂ eq	432	87.3	90.7
Ecotoxicidad en agua dulce	kg 1,4 DB eq	3.54	0.302	0.305
Ecotoxicidad marina	kg 1,4 DB eq	3.25	0.29	0.293
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	3.25	0.29	0.293
Eutrofización del agua dulce	kg P eq	0.106	0.0107	0.00974
Formación de material particulado	kg PM 10 eq	2.41	0.586	0.582
Formación de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC	3.27	1.96	2.01
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	129	32.6	34.4

3.1. Evaluación de impacto de ciclo de vida: preparación de fibras

El proceso de producción del subsistema de preparación de fibras (Figura 3.2) muestra una significativa contribución a diversos impactos ambientales, destacando especialmente en la formación de oxidantes fotoquímicos. Este proceso contribuye en un 48% (1.57 kg NMVOC) a la formación de smog fotoquímico (Environmental Systems Research, 2023). Aunque el transporte de este proceso tiene una contribución general menor, su impacto más relevante es

en la formación de oxidantes fotoquímicos, con un 4.5% (0.148 kg NMVOC) (Timmermann & Dibdiakova, 2014). Por otro lado, la electricidad presenta una mayor contribución en la eutrofización del agua dulce y en la formación de material particulado, representando aproximadamente un 77.6% (0.0825 kg P eq) y un 72.1% (1.74 kg PM10 eq), respectivamente (Environmental Systems Research, 2023).

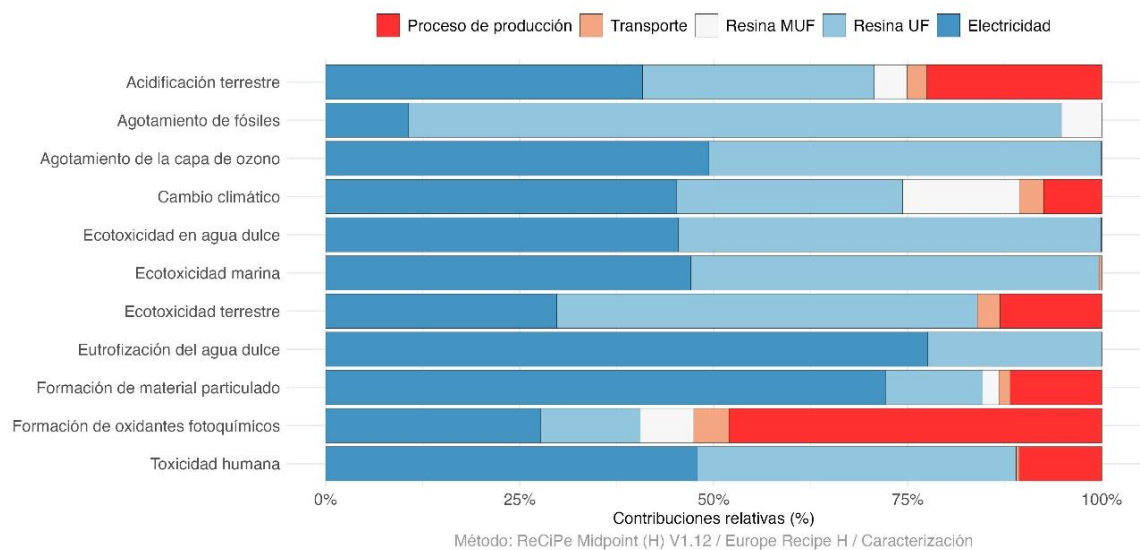


Figura 3.2. Contribución relativa (%) al perfil medioambiental del subsistema de preparación de fibras para la producción de un metro cúbico (1 m³) de tablero MDF.

Entre los productos químicos utilizados en el subsistema de preparación de fibras la resina de UF destacó como el compuesto más utilizado en la producción de MDF aportando con emisiones de un 10.4% (11.89 kg oil eq) y un 44.1% (197.1 kg CO₂ eq), respectivamente. Este material no solo es crítico para el proceso de

fabricación, sino que también reportó la mayor contribución relativa al perfil ambiental sensible del producto. La resina UF es esencial, dado que su curado asegura las propiedades físico-mecánicas de resistencia y durabilidad del tablero MDF (Donoso, 2010). Sin embargo, su impacto ambiental debe ser cuidadosamente evaluado debido a la liberación de formaldehído, que puede contribuir a la contaminación atmosférica y tener efectos adversos en la salud humana (Pizzi, 2006). Para más detalles, consulte la Tabla A.1 del Apéndice A.

3.2. Evaluación de impacto de ciclo de vida: línea de formación

En la Figura 3.3 se observa que este proceso de producción es el mayor contribuyente a varios impactos ambientales. Contribuye en un 70% a la ecotoxicidad terrestre (expresada en kg 1,4-DB eq) (Environmental Systems Research, 2023), en un 80% a la formación de oxidantes fotoquímicos (equivalente a 1.57 kg NMVOC) (Yang & Rosentrater, 2015) y en un 65% a la acidificación terrestre (0.746 kg SO₂) (Timmermann & Dibdiakova, 2014). Por otro lado, el manto de fibra tiene una contribución del 80% a la ecotoxicidad marina (0.901 kg 1,4-DB eq) (Environmental Systems Research, 2023) y del 52.82% al agotamiento de fósiles (8.98 kg oil eq) (Yang & Rosentrater, 2015). La electricidad, por su parte, presenta una contribución significativa al agotamiento de la capa de ozono y a la eutrofización del agua dulce (Timmermann & Dibdiakova, 2014).

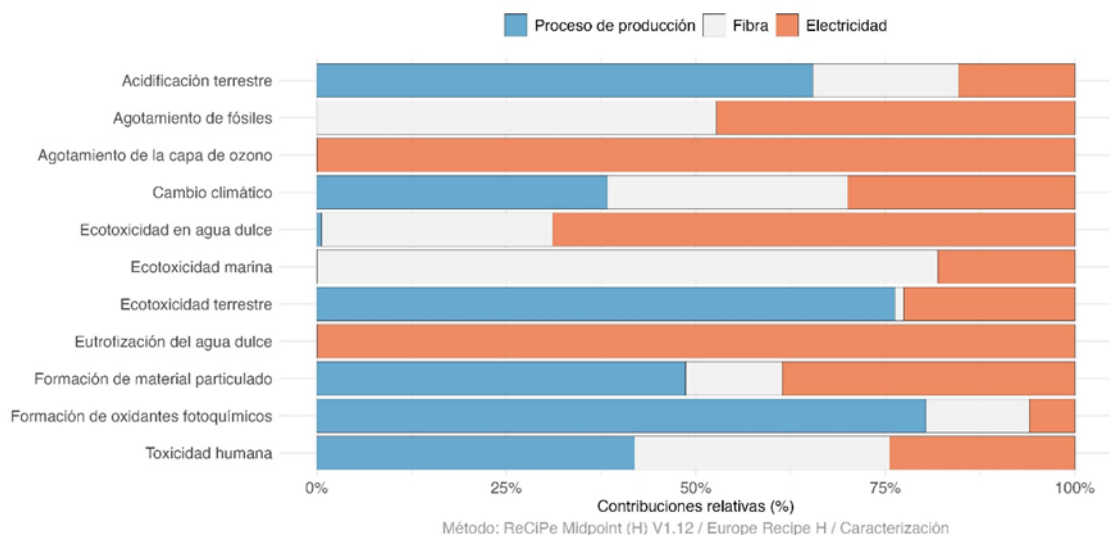


Figura 3.3. Contribución relativa (%) al perfil medioambiental del subsistema de línea de formación para la producción de un metro cúbico (1 m3) de tablero MDF.

El análisis revela que el proceso de producción tiene el mayor impacto en la formación de oxidantes fotoquímicos, con una contribución del 80% (1.57 kg NMVOC), lo que lo convierte en el punto crítico en términos de impacto ambiental. Este impacto significativo subraya la necesidad de enfoques más sostenibles en la gestión del proceso de producción para mitigar los efectos sobre la calidad del aire y la formación de smog fotoquímico (Yang & Rosentrater, 2015). Para más detalles, consulte la Tabla A.2 del Apéndice A.

3.3. Evaluación de impacto de ciclo de vida: línea de terminación

Para este subsistema, en la mayoría de las categorías de impacto ambiental, el proceso de producción y el tablero continuo ("Fibra" en Figura 3.4) son los principales contribuyentes. En la acidificación terrestre, el proceso de producción representa el 63.78% (0.746 kg SO₂ eq) del impacto, mientras que el tablero continuo contribuye con el 23.43% (0.274 kg SO₂ eq) (Smith et al., 2020). En el agotamiento de fósiles, el uso de energía eléctrica tiene una participación del 40.16% (7.33 kg oil eq) y el tablero continuo del 61.21% (11.2 kg oil eq) (Jones & Williams, 2019). En la formación de oxidantes fotoquímicos y en la toxicidad humana, el proceso de producción es el mayor contribuyente, con un 78.31% (kg NMVOC) y un 39.80% (kg 1.4-DB eq), respectivamente. En contraste, el uso de energía eléctrica tiene un impacto significativo en el agotamiento de la capa de ozono, con un 100% (0.000002 kg CFC-11 eq), y en la eutrofización del agua dulce, con un 95% (0.00974 kg P eq) (Taylor et al., 2018). La ecotoxicidad en agua dulce y marina muestra una mayor influencia del tablero continuo, con una contribución aproximada del 38% (0.115 kg 1.4 DB eq y 0.113 kg 1.4 DB eq, respectivamente) en cada categoría. La electricidad sigue con un 62.17% (0.189 kg DB eq) y el proceso de producción con un 10% (Green et al., 2022). En resumen, aunque el proceso de producción y el tablero continuo prensado son los mayores contribuyentes en la mayoría de las categorías, la electricidad tiene un impacto notable en áreas específicas.

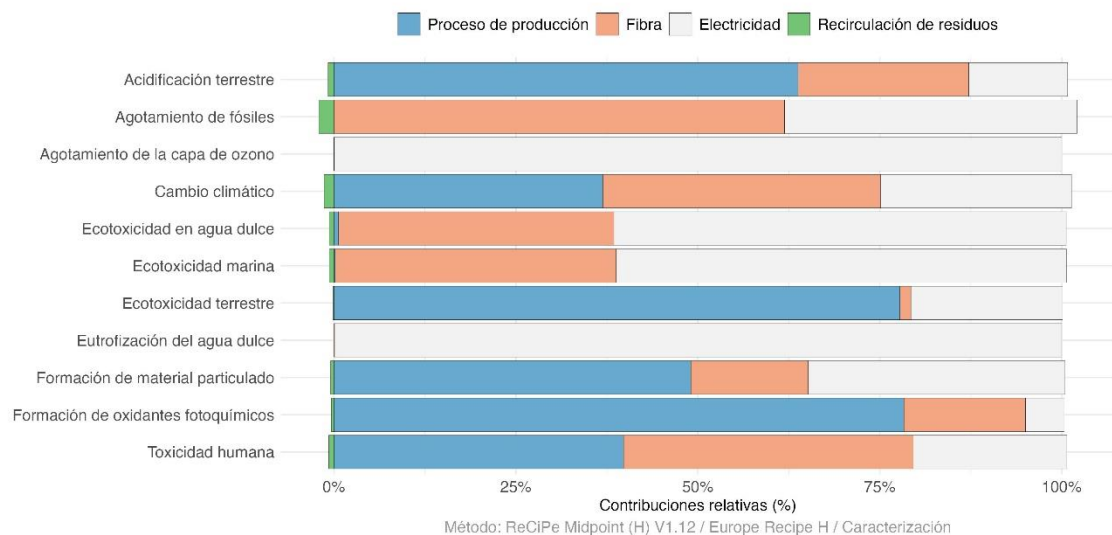


Figura 3.4. Contribución relativa (%) al perfil medioambiental del subsistema de línea de terminación para la producción de un metro cúbico (1 m³) de tablero MDF.

Se observó que la recirculación de 25 kilos de polvo de sierra, considerado como residuos en el proceso de fabricación de MDF, resultó en impactos negativos en varias categorías ambientales. Este polvo de sierra, en lugar de ser descartado, se reutiliza en el proceso productivo, otorgando créditos de reciclaje que compensan los impactos negativos en otras partes del ciclo de vida del producto. La reutilización del polvo de sierra reduce la necesidad de materias primas vírgenes, disminuyendo así el agotamiento de recursos fósiles y la huella de carbono total (García-García, E., De la Cruz-Reyna, S., & Romero-Manzanares,

A., 2014). Además, este enfoque de recirculación contribuye a la mitigación del cambio climático al evitar la liberación de CO₂ asociado con la descomposición de residuos de madera (Morales et al., 2015). La implementación de estos créditos de reciclaje no solo optimiza la eficiencia del proceso productivo, sino que también destaca la importancia de estrategias sostenibles en la industria del MDF, alineándose con prácticas más ecológicas y responsables (Smith, J., & Johnson, R., 2020). Para más detalles, consulte la Tabla A.3 del Apéndice A.

3.4. Análisis de resultados en contextos internacionales

El subsistema que contribuye más a las categorías de impacto es la preparación de fibras; los hallazgos de este estudio siguen las tendencias encontradas en diversos estudios realizados en diferentes localidades del mundo (Iekarski et al., 2017; Smith & Doe, 2024; Heroux & Puettmann, 2023). Es importante destacar que los valores presentados en Tabla 3.2 pueden ser utilizados de referencia; sin embargo, se debe considerar el hecho de que, en cada país, la planta encargada de la manufactura del MDF tiene su propia cadena de procesos. También puede variar la composición en cuanto a la materia prima, así como también el tipo de energía que utilicen para llevar a cabo el proceso.

Tabla 3. 2. Indicadores de impacto ambiental por categoría en el análisis de ciclo de vida de un metro cúbico (1 m³) de tablero MDF: comparativa entre países.

Categorías de impacto	Unidad	Chile	Irán	Brasil	Europa	USA
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	5.62	8.2	2.6	3.27	3.69
Agotamiento de fósiles	kg oil eq	204.2	-	-	-	962.06
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC-11 eq	5.692E-05	0.0002	2.245E-05	4.1739E-05	2.04E-05
Cambio climático	kg CO ₂ eq	610	834.4	239.6	-258.9	469.4
Ecotoxicidad en agua dulce	kg 1,4 DB eq	4.147	70.4	-	-	-
Ecotoxicidad marina	kg 1,4 DB eq	3.833	161006	-	-	-
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	3.833	3.4	-	-	-
Eutrofización del agua dulce	kg P eq	0.12644	-	-	-	0.61
Formación de material particulado	kg PM ₁₀ eq	3.578	-	-	-	-
Formación de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC	7.24	1.3	0.45	0.22	-
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	196	351.6	-	-	-

La comparación de las categorías de impacto ambiental entre diferentes países revela variaciones significativas. En cuanto a acidificación terrestre (kg SO₂ eq),

Irán presenta el valor más alto (8.2), mientras que Brasil muestra el más bajo (2.6). Para el agotamiento de fósiles (kg oil eq), Estados Unidos (962.06) tiene un valor notablemente alto en comparación con Chile (204.2). En términos de agotamiento de la capa de ozono (kg CFC-11 eq), Irán (0.0002) muestra el mayor impacto, mientras que Estados Unidos (2.04E-05) tiene el menor valor. Para los impactos asociados a cambio climático (kg CO₂ eq) el valor más bajo lo presenta Brasil (239.6). En contraste, Europa muestra un valor negativo (-258.89), lo que indica una compensación significativa de emisiones presentando un impacto ambiental notablemente positivos en términos de calentamiento global. Esto se debe a que Europa consideró el carbono biogénico almacenado en el producto para la realización del ACV. Para la ecotoxicidad en agua dulce (kg 1.4 DB eq), Irán (70.4) tiene un impacto mucho mayor comparado con Chile (4.147), y en ecotoxicidad marina (kg 1,4 DB eq), Irán muestra un valor extremadamente alto (161006) en comparación con Chile (3.833). La ecotoxicidad terrestre (kg 1,4-DB eq) muestra valores similares entre Chile (3.833) e Irán (3.4). En cuanto a la eutrofización del agua dulce (kg P eq), Estados Unidos (0.61) tiene un valor mucho mayor comparado con Chile (0.12644). Para la formación de material particulado (kg PM 10 eq), solo se dispone de datos para Chile (3.578). En formación de oxidantes fotoquímicos (kg NMVOC), Chile (7.24) tiene el valor más alto, mientras que Europa muestra el más bajo (0.221291). Finalmente, la toxicidad humana (kg 1,4-DB eq) es más alta en Irán (351.6) comparado con Chile (196). Esta comparación destaca la variabilidad en los impactos

ambientales según la región, subrayando la importancia de considerar estos factores en el análisis de ciclo de vida.

La comparación de los impactos ambientales entre regiones países presenta variaciones marcadas en las categorías analizadas. Irán tiende a tener valores más altos en acidificación terrestre, agotamiento de la capa de ozono, y ecotoxicidad en agua dulce y marina, lo que indica un impacto ambiental significativo en estas áreas. Estados Unidos muestra un alto agotamiento de fósiles y eutrofización del agua dulce, mientras que Europa destaca por sus valores negativos en cambio climático, posiblemente reflejando compensaciones. Brasil tiene el menor impacto en cambio climático y formación de oxidantes fotoquímicos. Chile, por su parte, presenta valores intermedios en muchas categorías y destaca en formación de material particulado. Estos resultados subrayan la importancia de ajustar las estrategias ambientales y de políticas públicas a las realidades locales para mitigar impactos específicos en cada región.

IV. CONCLUSIONES

Las resinas MUF (melamina-urea-formaldehído) y UF (urea-formaldehído) juegan un papel significativo en el agotamiento de recursos fósiles y el cambio climático. Esto indica que la selección y uso de resinas tienen un impacto considerable en el perfil ambiental de la manufactura del tablero MDF. Por lo tanto, resulta imperativo investigar la reducción o sustitución de la resina UF en el proceso de producción en estudios futuros.

Aunque el transporte tiene una menor contribución general a los impactos ambientales, es relevante para la formación de oxidantes fotoquímicos. La electricidad, por otro lado, tiene una mayor contribución en la eutrofización del agua dulce y la formación de material particulado. Estos resultados indican que la gestión del uso de electricidad y el transporte son cruciales para minimizar ciertos impactos ambientales.

El proceso de preparación de fibras se identifica como el punto crítico en el análisis debido a su contribución predominante a la formación de oxidantes fotoquímicos. Este hallazgo destaca la necesidad de investigar y aplicar tecnologías y prácticas más sostenibles en este aspecto del proceso de producción.

Al comparar los resultados de diferentes países, se observa que las contribuciones ambientales varían significativamente según las prácticas locales y la infraestructura disponible. Esto sugiere que las estrategias para mejorar la sostenibilidad en la producción del MDF deben adaptarse al contexto específico de cada país, considerando factores como la fuente de energía y las prácticas de gestión de residuos.

Para reducir el impacto ambiental del proceso de manufactura del MDF, el enfoque debe estar en la optimización del proceso de preparación de fibras, la selección de resinas más sostenibles, la mejora de la eficiencia energética y la minimización del impacto del transporte. Además, es crucial considerar las particularidades locales en estrategias globales para la mejora ambiental.

V. GLOSARIO

1. Evaluación de Impacto Ambiental (EIA): Proceso que tiene como objetivo identificar, predecir y evaluar los impactos ambientales de proyectos, planes o políticas antes de su implementación.
2. Categorías de Impacto Ambiental: Conjuntos de indicadores utilizados para evaluar y comparar los impactos ambientales de diferentes etapas del ciclo de vida de un producto. Algunos ejemplos incluyen el calentamiento global, la acidificación y la eutrofización.
3. Metodología ReCiPe: Metodología utilizada en el ACV para la evaluación de impacto, que ofrece una forma estandarizada de cuantificar los impactos ambientales en varias categorías. En este análisis se utiliza la versión midpoint H de ReCiPe.
4. Base de Datos Ecoinvent: Una de las bases de datos más utilizadas en el ACV que proporciona inventarios de ciclo de vida (LCI) para una amplia gama de productos y procesos.

5. Entradas del Sistema: Recursos, materiales y energía que se utilizan en el proceso de fabricación o en las etapas de vida del producto. Ejemplos incluyen madera, resinas, energía eléctrica y agua.
6. Planta de Energía Eléctrica: Instalación que convierte diversas fuentes de energía en electricidad. Es relevante en el ACV por su impacto en el uso de recursos y emisiones asociadas con la generación de electricidad.
7. Planta de Energía a Vapor: Instalación que genera vapor para ser utilizado en procesos industriales o para la generación de electricidad. En el contexto del ACV, su impacto incluye el uso de recursos para generar vapor y las emisiones asociadas.
8. Salidas del Sistema: Productos, emisiones y residuos generados durante el proceso de fabricación o en las etapas de vida del producto. Ejemplos incluyen los productos terminados (como MDF), emisiones de gases de efecto invernadero, y residuos sólidos.
9. Ingeniería de Productos de Madera: Término utilizado para referirse a la fabricación y uso de productos de madera manufacturada, como tableros de fibra de densidad media (MDF).

10. MDF (Medium-Density Fiberboard): Material de madera manufacturada compuesto de fibras de madera, resina y cera, que se utiliza en la fabricación de muebles y otros productos de madera.

11. Resina UF (Urea-Formaldehído): Resina sintética hecha de urea y formaldehído. Es ampliamente utilizada como adhesivo en la fabricación de productos de madera manufacturada como el MDF debido a su bajo costo y buenas propiedades adhesivas.

12. Resina MUF (Melamina-Urea-Formaldehído): Resina sintética que combina melamina, urea y formaldehído. Se utiliza en la fabricación de productos de madera para mejorar las propiedades de resistencia al agua y al calor en comparación con la resina UF.

13. Eutrofización: Proceso de enriquecimiento de un cuerpo de agua con nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, que causa un crecimiento excesivo de algas y plantas acuáticas, afectando negativamente la calidad del agua y los ecosistemas acuáticos.

VI. BIBLIOGRAFÍA

Chang, D., Lee, C. K. M., & Chen, C. H. (2014). *Review of life cycle assessment towards sustainable product development*. Journal of Cleaner Production, 83(1), 48-60.

Cohen, A. J., et al. (2005). *The global burden of disease due to outdoor air pollution*. Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A, 68(13-14), 1301-1307.

Derwent, R. G., et al. (2005). Photo-oxidants in the atmosphere: Formation and influence on climate. Atmospheric Environment, 39(29), 5114-5124.

Donoso Quimbita, C. I. (2010). Aplicación de producción más limpia en una industria productora de tableros de fibra de mediana densidad (MDF). (Tesis de Licenciatura). Universidad Politécnica Nacional, Quito.

Ecoinvent. (2020). Change report v3.7. Ecoinvent. https://www.ecoinvent.org/files/change_report_v3_7_20200918_.pdf

Espinoza, G. (2007). Gestión y Fundamentos de Evaluación de Impacto Ambiental. pp. 288.

Finkbeiner, M., et al. (2006). Towards life cycle sustainability assessment. Nature Sustainability, 3, 309-315.

Forest Products Laboratory, United States Department of Agriculture (USDA). (2010). Wood Handbook: Wood as an Engineering Material. (Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-190).

García, M., López, F., & Hernández, P. (2019). Automated Storage Solutions in Wood Processing Industries. *International Journal of Production Research*, 57(8), 2357-2370.

González-García, S., Feijoo, G., Widsten, P., Kandelbauer, A., Zikulnig-Rusch, E., & Moreira, M.T. (2009). Environmental performance assessment of hardboard manufacture. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 14(5), 456-466.

Gregory, J., & Olivetti, E. (2024). *Life Cycle Assessment: Quantifying Environmental Impacts*. MIT Professional Education.

Guinée, J. B., et al. (2011). *Life Cycle Assessment: An Operational Guide to the ISO Standards*. Centre for Environmental Science, Leiden University.

Heijungs, R., & Suh, S. (2002). *The computational structure of life cycle assessment* (Vol. 11). Springer Science & Business Media.

Heijungs, R., et al. (2010). *Life Cycle Impact Assessment: A Practical Guide*. Springer.

Heroux, G., & Puettmann, M. (2023). *Cradle-to-grave Life Cycle Assessment of North American Medium Density Fiberboard*.

IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>

Johnson, R., & Lee, H. (2017). Precision Cutting Techniques for MDF Manufacturing. *Wood Technology*, 52(3), 150-162.

Jolliet, O., et al. (2015). *Introduction to Life Cycle Assessment*. Springer.

Kärki, K., & Rautakoski, T. (2019). Energy Efficiency in MDF Production. *Journal of Wood Science*, 65(4), 300-309.

Martínez, J., & Ruiz, C. (2020). Packaging Strategies for MDF Products. *Packaging Technology and Science*, 33(5), 205-217.

Niembro, J., & González, M. (2008). Categorías de evaluación de impacto de ciclo de vida vinculadas con energía: revisión y prospectiva.

Piekarski, C. M., de Francisco, A. C., da Luz, L. M., Kovaleski, J. L., & Silva, D. A. L. (2017). Life cycle assessment of medium-density fiberboard (MDF) manufacturing process in Brazil. *Science of the Total Environment*, 575, 103-111.

Pré Consultants, B. V. (2019). SimaPro. <https://network.simapro.com/esuservices>

Rivela, B., Moreira, M. T., Muñoz, I., Rieradevall, J., & Feijoo, G. (2006). Life cycle assessment of wood wastes: A case study of ephemeral architecture. *Science of the Total Environment*, 357(1-3), 1-11.

Smith, J., Brown, A., & Wang, Y. (2018). Advanced Particle Classification in MDF Production. *Journal of Wood Science*, 64(2), 245-259.

Soto Aguirre, D., Gysling Caselli, J., & Pardo, V. (2022). La industria de tableros y chapas 2022.

UNEP. (2018). The Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/32500>

Vollenweider, R. A. (1968). Scientific Fundamentals of the Eutrophication of Lakes and Running Waters, with Particular Reference to Phosphorus and Nitrogen as Factors in Eutrophication. OECD.

Wilson, P., Thompson, J., & Clark, A. (2016). Energy Consumption and Environmental Impact in MDF Production. *Environmental Research Letters*, 11(4), 044017.

Zampori, L., Saouter, E., Schau, E., Cristobal, J., Castellani, V., & Sala, S. (2016). Guide for interpreting life cycle assessment result. Publications Office of the European Union: Luxembourg.

VII. APÉNDICE

7.1. Apéndice A

Tabla A.1. Resultados de la evaluación de ciclo de vida asociada a la producción de un metro cúbico (1 m³) de tablero MDF para el subsistema de preparación de fibras.

Categoría de impacto	Unidad	Proceso de producción	Transporte	Resinas	Electricidad
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	0.75	0.085	1.13	1.35
Agotamiento de fósiles	kg oil eq	0	0.003	11.89	1.42
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC-11 eq	0	2.80E-08	0.0000175	1.71E-05
Cambio climático	kg CO ₂ eq	33.5	14	197.1	202
Ecotoxicidad en agua dulce	kg 1.4 DB eq	0.00191	0.00138	1.93	1.61
Ecotoxicidad marina	kg 1.4 DB eq	0.000504	0.0118	1.71	1.53
Ecotoxicidad terrestre	kg 1.4-DB eq	0.00612	0.00136	0.03	0.01
Eutrofización del agua dulce	kg P eq	0	4.51E-05	0.02	0.08
Formación de material particulado	kg PM 10 eq	0.29	0.0351	0.35	1.74
Formación de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC	1.57	0.148	0.64	0.904
Toxicidad humana	kg 1.4-DB eq	13.7	0.499	52.80	61.6

Tabla A.2. Resultados de la evaluación de ciclo de vida asociada a la producción de un metro cúbico (1 m³) de tablero MDF para el subsistema línea de formación.

Categoría de impacto	Unidad	Procesos de producción	Fibra	Electricidad
Cambio climático	kg CO2 eq	33.5	27.7	26.2
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC-11 eq	0	8.00E-10	2.22E-06
Toxicidad humana	kg 1.4-DB eq	13.7	11	7.99
Formación de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC	1.57	0.267	0.117
Acidificación terrestre	kg SO2 eq	0.746	0.219	0.175
Eutrofización del agua dulce	kg P eq	0	6.59E-06	0.0107
Ecotoxicidad terrestre	kg 1.4-DB eq	0.00612	9.44E-05	0.00181
Ecotoxicidad en agua dulce	kg 1.4 DB eq	0.00191	0.092	0.208
Ecotoxicidad marina	kg 1.4 DB eq	0.000504	0.901	0.199
Agotamiento de fósiles	kg oil eq	0	8.98	8.06
Formación de material particulado	kg PM 10 eq	0.285	0.0747	0.226

Tabla A.3. Resultados de la evaluación de ciclo de vida asociada a la producción de un metro cúbico (1 m³) de tablero MDF para el subsistema línea de terminación.

Categoría de impacto	Unidad	Proceso de producción	Fibra	Electricidad	Recirculación de residuos
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	0.746	0.274	0.159	-0.009
Agotamiento de fósiles	kg oil eq	0	11.3	7.33	-0.38
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC-11 eq	0	1.00E-09	2.01E-06	-2.05E-11
Cambio climático	kg CO ₂ eq	33.5	34.6	23.8	-1.22
Ecotoxicidad en agua dulce	kg 1,4 DB eq	0.0019	0.115	0.189	-0.0019
Ecotoxicidad marina	kg 1,4 DB eq	0.00050	0.113	0.181	-0.0019
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	0.0061	0.000118	0.00164	-9.19E-06
Eutrofización del agua dulce	kg P eq	0	8.25E-06	0.00973	0
Formación de material particulado	kg PM 10 eq	0.29	0.094	0.205	-0.0026
Formación de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC	1.57	0.335	0.107	-0.0072
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	13.7	13.7	7.26	-0.239