

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Arquitectura y Urbanismo

Escuela de Ingeniería en Construcción

Maestría en Diseño y Construcción Sostenible

**Estimación de la huella de carbono de tres especies forestales utilizadas en
Costa Rica, mediante un enfoque de Análisis de Ciclo de Vida**

Trabajo Final de Graduación para optar por el título de:

Magister Scientiae (M.Sc.) en Diseño y Construcción Sostenible

Ing. Jonathan Fallas Mora

Cartago, 24 de mayo de 2024

Declaración de derechos de autor

De acuerdo con la ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683 el autor conserva el derecho moral y patrimonial sobre la obra, no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones, reproducciones u obras derivadas de la misma. Para cualquier adaptación, comunicación al público o modificación de la obra, se deberá contar con autorización expresa y por escrito del autor.

Licencia creative commons

Estimación de la huella de carbono de tres especies forestales utilizadas en Costa Rica, mediante un enfoque de Análisis de Ciclo de Vida © 2024 by Jonathan Fallas is licensed under Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



Declaración de uso de herramientas de inteligencia artificial

Declaro que utilicé herramientas de inteligencia artificial para la elaboración del presente trabajo final de graduación. Las herramientas utilizadas fueron: Chat GPT y se emplearon en el desarrollo de las siguientes secciones:

- Abstract: para la traducción.
- Problema de investigación, justificación, antecedentes y estado de la cuestión, marco teórico, resultados: como motor de búsqueda de fuentes bibliográficas.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi familia, novia y mentores, cuyo apoyo y guía han sido fundamentales para la elaboración de esta investigación.

Agradecimiento

Deseo extender mi más sincero agradecimiento a aquellos cuya guía, apoyo y colaboración han sido indispensables en la realización de esta investigación.

Primero al Ing. Juan Tuk, mi mentor en el uso de la madera como material de construcción y un verdadero maestro de vida. Su enseñanza sobre la sostenibilidad desde un punto de vista técnico ha sido una inspiración constante. Más allá de las lecciones profesionales, su ejemplo de vida y su enfoque en la sostenibilidad han moldeado mi perspectiva y mi compromiso con hacer del mundo un lugar más sostenible.

Al Ing. Carlos Castro Campos, profesor tutor, cuya dirección experta y consejos sabios me han guiado a través de este complejo viaje de investigación.

Al Ing. Luis Guillermo Valerio, profesor y coordinador del Laboratorio de Ciclo de Vida y Economía Circular del Tecnológico de Costa Rica, le agradezco profundamente por su disposición a compartir su vasto conocimiento y experiencia ha enriquecido enormemente este trabajo.

A la empresa Ecomundo SRL, agradezco por abrirme las puertas y facilitarme información vital sobre la industrialización de la madera. Su transparencia y disposición para colaborar reflejan un genuino compromiso con el avance de prácticas sostenibles en la industria. También, un especial reconocimiento al Sr. Cristian Chavarría, encargado de extracción de madera, cuya colaboración al proporcionar datos cruciales ha sido fundamental para la autenticidad y relevancia de esta investigación.

Finalmente, a la Maestría en Diseño y Construcción Sostenible del Tecnológico de Costa Rica y a todo su equipo de profesores, les estoy profundamente agradecido por su dedicación y esfuerzo. La riqueza de conocimientos compartidos y el entorno que han creado han sido pilares en la formación académica y profesional.

A todos, mi más profunda gratitud. Espero que juntos continuemos contribuyendo a un mundo más sostenible y consciente.

Resumen

La investigación desarrollada en esta tesis se centra en la evaluación del impacto ambiental generado por la extracción e industrialización de tres especies forestales en Costa Rica, abarcando desde la tala hasta su preparación final antes de la venta como madera seca sin cepillar, en lo que denomino un análisis de la tala a la puerta. Este estudio se alinea con el compromiso del país por mantener un desarrollo sostenible y responsable con el entorno natural, especialmente relevante en la industria maderera, un sector de notoria influencia económica y ambiental.

Utilizando el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) conforme a la norma INTE/ISO 14067:2019 y el software SimaPro, se realiza una meticulosa cuantificación de la huella de carbono de las especies forestales seleccionadas. La elección de estas especies se basó en criterios técnicos que incluyen la disponibilidad en el mercado y la disponibilidad de datos, entre otros factores. La información recopilada y analizada ofrece una visión clara de las emisiones de gases de efecto invernadero por cada fase del proceso productivo, permitiendo así identificar las etapas que más contribuyen a la huella de carbono total y examinar la relación entre las características intrínsecas de las especies forestales y sus respectivas huellas de carbono.

Los resultados obtenidos tienen implicaciones significativas para la industria maderera del país, proporcionando a los actores del sector una visión más clara de los impactos ambientales de sus operaciones. Esto facilita la adopción de prácticas más sostenibles y la elección consciente de especies forestales que contribuyan a una menor huella de carbono, aspectos de gran importancia en el contexto actual de toma de decisiones comerciales y de inversión orientadas a la sostenibilidad.

Este trabajo también identifica áreas específicas dentro de la cadena de suministro donde las mejoras podrían llevar a reducciones significativas de las emisiones, tales como la optimización de rutas de transporte, la adopción de tecnologías más limpias y la implementación de prácticas de gestión forestal sostenible.

En un escenario global marcado por la urgencia de combatir el cambio climático, la precisa cuantificación de las emisiones de gases de efecto invernadero es fundamental. Este estudio contribuye a este esfuerzo global, no solo proporcionando datos específicos sobre las emisiones asociadas a la producción de madera en Costa Rica, sino también ofreciendo un modelo que puede ser replicado en otras regiones para evaluar las huellas de carbono de diversas especies y sistemas de producción maderera.

La investigación tiene la capacidad de convertirse en una herramienta invaluable para la toma de decisiones sostenibles dentro de la industria maderera costarricense, contribuyendo así al objetivo más amplio de mitigar el cambio climático y preservar los valiosos recursos forestales del país y del planeta. Con la información generada, se espera influir positivamente en la formulación de políticas, regulaciones y prácticas de construcción que favorezcan la sostenibilidad ambiental en Costa Rica.

Palabras clave: *Life cycle assessment, SimaPro, Construcción Sostenible, Carbono neutralidad.*

Abstract

This thesis represents an endeavor to understand and quantify the environmental impact of three wood species used in Costa Rica. Through a Life Cycle Assessment (LCA) methodology with a cradle-to-gate approach, this study illuminates the greenhouse gas emissions associated with each phase of the wood supply chain. Costa Rica is recognized for its commitment to environmental conservation and sustainability. The wood industry, significant to the country's economy, faces challenges in sustainable forest management and reducing environmental impacts. The LCA approach of this research entails a thorough evaluation of emissions from logging, processing, transportation, and industrialization of wood. This provides a clear view of each phase's contribution to the total carbon footprint, addressing the question: What is the impact of production and industrialization on the total carbon footprint considering the stored carbon of three wood species used in construction in Costa Rica?

The research focuses on estimating the carbon footprint of three wood species through a life cycle analysis approach. For this purpose, three wood species were selected based on technical criteria such as market availability, data availability, types of uses, among others. With this selection, information from the life cycle stages from cradle to gate was compiled. Subsequently, using the INTE/ISO 14067:2019 standard and SimaPro 9.4.0.3 software, the carbon footprint of each species was estimated; allowing the identification of processes with the highest environmental impact, as well as determining if there is a correlation between the intrinsic characteristics of each species and its carbon footprint.

The results of this study have several significant implications. Firstly, they will assist stakeholders in the wood industry to better understand the environmental impacts of their operations and products, potentially leading to the adoption of more sustainable practices and the selection of wood species with lower carbon footprints. This is crucial at a time when sustainability and environmental responsibility are key factors in business and investment decisions.

Additionally, this approach identified specific areas in the supply chain where improvements and significant emissions reductions can be implemented, including optimizing transport routes, adopting cleaner wood processing technologies, and sustainable forest management.

In the global fight against climate change, accurate quantification of greenhouse gas emissions is essential. This study contributes to this effort by providing specific data on emissions associated with wood production in Costa Rica. Moreover, it offers a model that could be replicated in other regions to assess and compare the carbon footprints of different wood species and production systems.

The research has the potential to be an invaluable tool for making sustainable decisions in the Costa Rican wood industry; by addressing the carbon footprint comprehensively, it contributes to the broader goal of mitigating climate change and preserving Costa Rica's valuable forest resources.

Keywords: Life Cycle Assessment, SimaPro, Sustainable Construction, Carbon Neutrality.

Tabla de Contenidos

Declaración de derechos de autor	2
Licencia creative commons	2
Declaración de uso de herramientas de inteligencia artificial	2
Dedicatoria.....	3
Agradecimiento.....	4
Resumen	5
Abstract.....	7
Introducción.....	11
Problema de investigación.....	13
Justificación.....	15
Objetivos	19
Objetivo General	19
Objetivos Específicos	19
Alcances y limitaciones	20
Alcances.....	20
Limitaciones.....	22
Antecedentes y estado de la cuestión	24
Marco Teórico	30
Conceptos:.....	30
Huella de Carbono	30
Análisis de Ciclo de Vida (ACV)	31
La madera y el carbono.....	31
Normativa.....	32
Software	33
Investigaciones Relacionadas	34
Marco Legal y Regulatorio.....	38
El Acuerdo de París	38
Plan Nacional de Descarbonización.....	39
Contribución Nacional Determinada Costa Rica.....	39
Directriz n°050-MINAE.....	40
Marco Metodológico.....	41
Revisión Bibliográfica:.....	41
Base de Datos:.....	41
Estimación del dióxido de carbono (CO ₂) fijado en cada especie de madera	43
Estimación de la Huella de Carbono:.....	43
Determinación de las principales fuentes de emisiones de carbono.....	44
Resultados.....	46

Conformación de la Base de Datos.....	46
Rendimientos.....	51
Insumos.....	56
Base de Datos	67
Carbono almacenado	74
Guanacaste (Enterolobium cyclocarpum).....	75
Cedro (Cedrela odorata L.).....	78
Pochote (Bombacopsis quinata)	79
Análisis.....	81
Huella de Carbono.....	83
Empresa/organización, producto y categoría de producto.	83
Requisitos para la evaluación del ciclo de vida subyacente	88
Análisis del inventario del ciclo de vida	91
Categorías de impacto y factores de caracterización	92
Modelado del proceso en SIMAPRO.....	93
Huella de Carbono	96
Principales Fuentes de Emisiones.	100
Conclusiones y recomendaciones.....	109
Conclusiones.....	109
Recomendaciones	110
Bibliografía	112
Apéndice	118
Plan de Manejo Forestal.....	118
Equipos	132

Introducción

La presente tesis titulada " Estimación de la huella de carbono de tres especies forestales utilizadas en Costa Rica, mediante un enfoque de Análisis de Ciclo de Vida" tiene como propósito fundamental cuantificar y analizar el impacto ambiental asociado con la extracción y suministro de madera, una materia prima vital en el sector de la construcción. Esta investigación se rige bajo la normativa INTE/ISO 14067:2019, empleando el software SimaPro 9.4.0.3, con el objetivo de desglosar y entender en profundidad las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generadas a lo largo de la cadena de suministro de las especies forestales seleccionadas: Guanacaste, Cedro y Pochote.

El objetivo general de este trabajo es estimar la huella de carbono "de la tala a la puerta de la industria" de dichas especies, identificando las principales fuentes de emisión de carbono y su contribución relativa a la huella total. Para alcanzar este fin, se han definido varios objetivos específicos que orientan la metodología y el alcance del estudio. En primer lugar, se ha creado una base de datos que detalla cada fase del ciclo de vida de las especies forestales, desde la tala y la extracción de materias primas hasta su transporte y procesamiento. Este esfuerzo culmina en una herramienta analítica robusta que sirve de soporte para el cálculo y la interpretación de las emisiones de carbono.

En segundo lugar, la investigación busca estimar la huella de carbono de cada especie forestal para cada etapa del ciclo de vida indicada anteriormente. Esto se realiza mediante la aplicación de la norma INTE/ISO 14067:2019 dentro del marco del software SimaPro, lo cual permite una evaluación detallada y consistente con los estándares internacionales.

Además, se determina la cantidad de dióxido de carbono (CO₂) fijado en cada especie forestal, a través del cálculo de carbono acumulado en la biomasa. Esta medición es esencial, ya que proporciona una visión integral del balance de carbono, considerando no solo las emisiones sino también la captura de carbono de los árboles.

Por último, se identifican las principales fuentes de emisiones de carbono a lo largo de la cadena de suministro y su peso relativo sobre la huella general. Este análisis es crucial para el desarrollo de indicadores que puedan conducir a mejoras en los procesos productivos, con el fin de mitigar el impacto ambiental de la industria maderera en Costa Rica.

El presente estudio es de gran relevancia en el contexto de la crisis climática global, ya que proporciona información valiosa para la toma de decisiones en el manejo sostenible de recursos forestales y en la implementación de prácticas de construcción más respetuosas con el medio ambiente. Asimismo, se alinea con los esfuerzos nacionales e internacionales para la reducción de la huella de carbono y refleja el compromiso con los objetivos de desarrollo sostenible y la conservación de los recursos naturales de Costa Rica.

Problema de investigación

El problema de investigación que se plantea en esta tesis se centra en la cuantificación y análisis del impacto ambiental derivado de la extracción e industrialización de tres especies forestales utilizadas en el sector de la construcción en Costa Rica. Esta problemática adquiere relevancia en un contexto global donde la sostenibilidad y la gestión ambiental responsable se han convertido en ejes centrales para la industria de la construcción, una de las más significativas en términos de consumo de recursos naturales y generación de emisiones de carbono.

El interrogante principal que guía esta investigación es: ¿Cuál es el impacto de la extracción e industrialización en la huella de carbono total, considerando el carbono almacenado, de tres especies forestales utilizadas en la construcción en Costa Rica? Este planteamiento busca explorar la contribución específica de cada etapa de la cadena de valor de la madera (desde la tala hasta el procesamiento) en la emisión de GEI, teniendo en cuenta la capacidad de secuestro de carbono de las especies en estudio.

De esta pregunta central se desprenden cuestionamientos adicionales que pretenden profundizar en la comprensión del tema:

¿Cuál es el proceso específico dentro del ciclo de vida de la madera que genera el mayor impacto en la huella de carbono? Este aspecto es crucial para identificar las etapas críticas que requieren de una intervención prioritaria, ya sea a través de la adopción de tecnologías más limpias, la mejora de los procesos logísticos o el cambio en las prácticas de manejo forestal.

¿Influye el tipo de madera, mediante sus características intrínsecas, en la huella de carbono? Al considerar las propiedades físicas y químicas de cada especie forestal, como la densidad y la tasa de crecimiento, se busca entender cómo estos factores pueden afectar la capacidad de secuestro de carbono y la intensidad de las emisiones durante su procesamiento.

La relevancia de estas preguntas se magnifica en el caso de Costa Rica, un país conocido por su rica biodiversidad y sus esfuerzos en conservación ambiental. Dado el compromiso del país con la

sostenibilidad y la reducción de emisiones de carbono, es imperativo disponer de información detallada y específica que permita optimizar el uso de los recursos forestales y minimizar su impacto climático.

Por lo tanto, el problema de investigación abarca una dimensión ambiental, económica y social, y busca proporcionar un marco de referencia científico para la toma de decisiones informadas en la industria maderera y de la construcción. La expectativa es que, al esclarecer estas incógnitas, se puedan plantear estrategias de mitigación efectivas y políticas públicas que impulsen una gestión forestal y una construcción más sostenibles en Costa Rica.

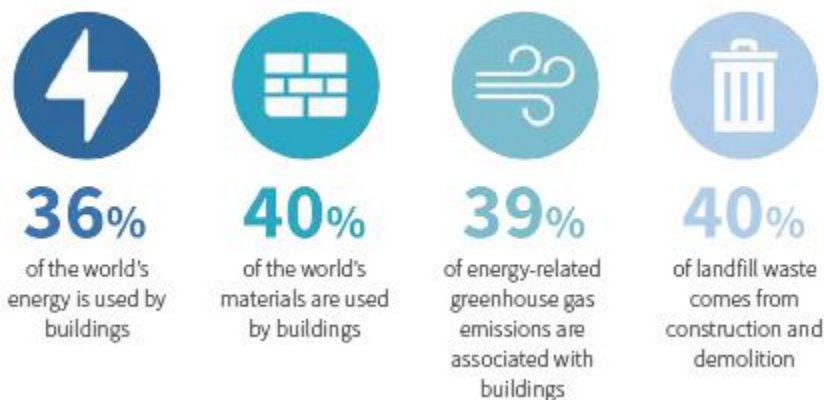
Justificación

La preocupación por los efectos del cambio climático y la necesidad de abordar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) han impulsado investigaciones y acciones en todo el mundo para comprender y mitigar los impactos ambientales de diversas actividades humanas. “El uso de materias primas para la producción de alimentos, energía y construcción ha venido incrementándose exponencialmente desde el siglo XIX, la predicción a futuro proyecta que la demanda de alimentos, combustibles y materiales de la construcción crecerán debido al incremento de la población mundial y el crecimiento económico” (Bringezu et al., 2017).

Ante un contexto global de creciente preocupación por el cambio climático y la conservación de los recursos naturales, y siendo el sector construcción uno de los principales emisores de gases de efecto invernadero (ONU, 2022); las emisiones de CO₂ de las operaciones de los edificios han alcanzado un máximo histórico de alrededor de 10 GtCO₂, alrededor de un 5% más que en 2020, y un 2% más que el pico anterior en 2019. Al incluir las emisiones de CO₂ estimadas de la producción de materiales de construcción de alrededor de 3,6 GtCO₂ (hormigón, acero, aluminio, vidrio y ladrillos), los edificios representan alrededor del 37% de las emisiones mundiales de CO₂ en 2021 (United Nations Environment Programme, 2022).

Figura 1.

Consumo de recursos y emisiones del sector construcción a nivel mundial



Fuente: (Crawford et al., 2019)

Es por esta razón que surge la necesidad de optar por edificaciones bajas en emisiones de acuerdo con el Plan Nacional de Descarbonización de 2019 que resalta en su eje 5 que “Al 2030 el 100% de las nuevas edificaciones comerciales, residenciales e institucionales se diseñarán y construirán adoptando sistemas y tecnologías que lleven a procesos de bajas emisiones y resiliencia” (Gobierno de Costa Rica, 2019b)

Además, el acuerdo de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de 2015 en París en su artículo 5 indica lo siguiente: “Se alienta a las Partes a que adopten medidas para aplicar y apoyar, también mediante los pagos basados en los resultados, el marco establecido en las orientaciones y decisiones pertinentes ya adoptadas en el ámbito de la Convención respecto de los enfoques de política y los incentivos positivos para reducir las emisiones debidas a la deforestación y la degradación de los bosques, y de la función de la conservación, la gestión sostenible de los bosques, y el aumento de las reservas forestales de carbono en los países en desarrollo, así como de los enfoques de política alternativos, como los que combinan la mitigación y la adaptación para la gestión integral y sostenible de los bosques, reafirmando al mismo tiempo la importancia de incentivar, cuando proceda, los beneficios no relacionados con el carbono que se derivan de esos enfoques” (Naciones Unidas, 2015).

Producto del acuerdo de Paris, la Contribución Nacional Determinada Costa Rica (*NDC, por sus siglas en inglés*) en su capítulo 4 menciona: “El país incrementará el uso en edificaciones de madera, bambú y otros materiales locales, incluyendo aquellos de plantaciones de bosques manejados sosteniblemente, hasta aumentar un mínimo de 10% en 2025 sobre la línea base del 2018. En este esfuerzo favorecerá el conocimiento y los oficios tradicionales sobre estos materiales a través de su transferencia generacional, reconocimiento y diálogo con saberes afines” (Gobierno de Costa Rica, 2020) así como “En el año 2030, el 100% de nuevas edificaciones se

diseñarán y construirán adoptando sistemas y tecnologías de bajas emisiones y resiliencia bajo parámetros bioclimáticos” (Gobierno de Costa Rica, 2020).

También es importante mencionar la Directriz n°050-MINAE "Directriz para la construcción sostenible en el sector público”, que indica: “Artículo 1.- Objetivo. La presente directriz tiene por objetivo promover la aplicación de prácticas de construcción sostenible en los edificios de toda la Administración Pública, tanto en aquellos que se vayan a construir como en los edificios existentes que se vayan a ampliar, adecuar, rehabilitar, renovar, mejorar, mantener o remodelar.” (Gobierno de Costa Rica, 2019a).

Debido a lo anterior hay una creciente demanda de materiales con declaración de impacto ambiental para cumplir con dichos lineamientos; en el país es necesario evaluar de manera integral las implicaciones ambientales de la utilización de madera nacional o importada, cuantificando la huella de carbono total de maderas utilizadas en la construcción, para que esto sirva de insumo posteriormente para realizar cálculos de carbono neutralidad en edificaciones.

La realización de un cálculo de huella de carbono para maderas utilizadas en Costa Rica; encuentra su justificación en la necesidad imperante de armonizar el crecimiento económico con la conservación de los recursos naturales y la protección del medio ambiente. Costa Rica, conocida por su compromiso con la sostenibilidad y su biodiversidad única, se enfrenta a un escenario en el cual la industria maderera ha cobrado un protagonismo considerable. Si bien esta industria ha contribuido al desarrollo económico y a la generación de empleos, también ha planteado retos ambientales que requieren abordarse de manera integral y fundamentada.

El rápido crecimiento de la demanda de madera, tanto para la construcción como para la industria de muebles y otros usos, ha llevado a una mayor explotación de los recursos forestales, que dicho sea de paso son escasos en el país. Por lo anterior, mucho del consumo de madera en el país es cubierto mediante importación; esto, a su vez, ha suscitado preocupaciones relacionadas con las emisiones de gases de efecto

invernadero derivadas de la cadena de producción. En este contexto, la presente investigación busca llenar un vacío en el conocimiento al abordar estos impactos ambientales de manera profunda y sistemática.

La justificación de este estudio radica en su potencial para informar y guiar tanto a las decisiones empresariales como a las políticas gubernamentales en busca de un equilibrio entre el aprovechamiento de los recursos naturales y la conservación del entorno. Al investigar desde un enfoque de análisis de ciclo de vida, las etapas críticas de la producción de la madera y los efectos ambientales asociados, se abrirá la puerta a la implementación de prácticas más sostenibles y a la adopción de tecnologías limpias en la producción y transformación de la madera.

Además, esta investigación ofrecerá datos tangibles y cuantificables que podrán ser utilizados para mejorar procesos de producción. Los resultados también pueden respaldar la toma de decisiones estratégicas en instituciones como el Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA) en su comité de Bandera Azul Categoría XV, la Oficina Nacional Forestal (ONF), el Instituto Costarricense de la Madera (ICOMADERA), entre otras instituciones y organismos.

A nivel gubernamental, los resultados de esta investigación pueden respaldar la formulación de políticas acordes a los objetivos de desarrollo sostenibles de la ONU. Esto podría traducirse en normativas que promuevan la sostenibilidad, establezcan estándares ambientales más rigurosos y fomenten la inversión en tecnologías limpias y que promuevan el uso de materiales con un menor impacto ambiental.

En última instancia, la justificación de esta investigación se sustenta en su potencial para contribuir a la construcción de un futuro en el que la producción y el uso de la madera en Costa Rica se realicen de manera armónica con la conservación del entorno natural y la preservación de la riqueza biológica. El cálculo de huella de carbono es una herramienta poderosa para toma de decisiones informadas y responsables que beneficien a la sociedad, a la economía y al medio ambiente.

Objetivos

Objetivo General

- Estimar la huella de carbono de la tala a la puerta de tres especies forestales utilizadas en la construcción en Costa Rica mediante la norma INTE/ISO 14067:2019 y el software SimaPro 9.4.0.3 determinando las principales fuentes de emisiones de carbono a lo largo de la cadena de suministro y su peso relativo sobre la huella general.

Objetivos Específicos

- Crear una base de datos detallados sobre cada fase del ciclo de vida de las especies forestales seleccionadas, desde la tala y la extracción de materias primas hasta su transporte y procesamiento.
- Determinar la cantidad de dióxido de carbono (CO₂) fijado en cada especie forestal, mediante el cálculo de carbono acumulado en biomasa, para la unidad funcional determinada en el análisis de ciclo de vida.
- Estimar la huella de carbono de cada especie forestal mediante la norma INTE/ISO 14067:2019 y el software SimaPro 9.4.0.3, para cada etapa del ciclo de vida comprendida entre la tala y la puerta.
- Identificar las principales fuentes de emisiones de carbono a lo largo de la cadena de suministro y su peso relativo sobre la huella general, generando indicadores que permitan mejoras en los procesos productivos.

Alcances y limitaciones

Alcances

El alcance de este proyecto de investigación se define en torno a los objetivos planteados, que buscan proporcionar una evaluación minuciosa de la huella de carbono para tres especies forestales usadas en la construcción en Costa Rica. Estos objetivos permiten delinear el marco en el cual se desarrollará el estudio, asegurando que las metas sean tanto alcanzables como pertinentes dentro de las limitaciones establecidas.

En primer lugar, el alcance incluye la creación de una base de datos detallada que documenta las etapas relevantes del ciclo de vida de las especies forestales seleccionadas. Esto abarca desde la tala y la extracción de la materia prima hasta su transporte y procesamiento, proporcionando una plataforma sólida para la comprensión de los consumos energéticos y las emisiones de GEI asociadas. La inclusión de estas etapas en el análisis asegura que se cubra una porción significativa del ciclo de vida de la madera, desde la "tala" hasta el momento en que está lista para ser distribuida como madera seca sin cepillar, conocido como "puerta".

El estudio también se extiende a la aplicación de la norma INTE/ISO 14067:2019 y el uso de SimaPro 9.4.0.3, lo que garantiza que la metodología de análisis sea consistente con estándares internacionales y que los resultados sean comparables con otros estudios similares. Este alcance metodológico es fundamental para asegurar la validez y la confiabilidad de la evaluación de la huella de carbono.

Un aspecto clave del alcance es la estimación del carbono secuestrado en la biomasa de las especies forestales. Este enfoque integral no solo mide las emisiones, sino que también reconoce la capacidad de la madera como sumidero de carbono, lo que es esencial para comprender su papel en la mitigación del cambio climático y en la gestión sostenible de los bosques.

La investigación propone además identificar y analizar las principales fuentes de emisiones de carbono a lo largo de la cadena de suministro. Esta evaluación detallada permite la identificación de etapas críticas y procesos que pueden ser optimizados para reducir la huella de carbono general. Este alcance analítico es crucial para informar las decisiones estratégicas que pueden llevar a la industria hacia prácticas más sostenibles.

Costa Rica es reconocida por su biodiversidad y compromiso con la sostenibilidad, pero al igual que otros países enfrenta desafíos relacionados con el uso racional de los recursos naturales; los principales usos de la madera nacional en el año 2022 fueron: tarimas con un 40.5%, construcción con un 27.6%, exportación con 18.2% y muebles con 10.6% (ONF, 2022), del 27.6% utilizado en la construcción 33% es para formaleta (ONF, 2022), es decir, elementos temporales y rápidamente perecederos de la construcción, por otro lado solo un 8.4% es utilizado para uso estructural (ONF, 2022), lo anterior demuestra que hay una gran brecha en la utilización de la madera como elemento permanente en la construcción costarricense, debido a esto es necesario promover el uso de la madera, especialmente debido a que es un material clave para alcanzar metas de sostenibilidad en el sector, y con esto cumplir con políticas nacionales propuestas como el Plan Nacional de Descarbonización (Gobierno de Costa Rica, 2019b)

En el contexto específico de Costa Rica, el estudio busca alinearse con los compromisos de sostenibilidad nacional y proporcionar datos que respalden el Plan Nacional de Descarbonización. Al concentrarse en especies utilizadas en la construcción, el proyecto apunta a influir directamente en un sector significativo, promoviendo un uso más estratégico y sostenible del recurso.

El alcance de este trabajo también implica una contribución significativa al cuerpo de conocimiento existente al proporcionar datos inéditos en el país. Estos datos no solo podrán ser utilizados para informar políticas y prácticas locales, sino que también establecerán una base comparativa para la evaluación de materiales en la industria de la construcción.

En síntesis, el alcance de la investigación es enfocado en ofrecer una contribución significativa al entendimiento de la huella de carbono en la industria de la madera y la construcción en Costa Rica, y para sentar las bases para la adopción de prácticas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente en el sector.

Limitaciones

Si bien el estudio se presenta como una iniciativa pionera en la evaluación ambiental del uso de madera en la construcción en Costa Rica, es importante reconocer y demarcar sus limitaciones con el fin de contextualizar adecuadamente los resultados y hallazgos.

La primera y más significativa limitación radica en la disponibilidad y la calidad de los datos. La estimación precisa de la huella de carbono depende en gran medida de datos fiables y actualizados sobre la gestión forestal, la operación de maquinaria y los procesos industriales asociados con la producción de madera. La escasez de estudios previos en el país y la falta de registros detallados de los procesos en cuanto a consumos y rendimientos pueden introducir incertidumbres en la evaluación.

La investigación se limita a tres especies forestales, lo que, aunque es representativo del mercado de la construcción de Costa Rica, no abarca toda la diversidad de maderas utilizadas en la industria. Por tanto, los resultados obtenidos pueden no ser generalizables a todas las especies forestales o aplicables a todos los contextos de uso dentro del país.

Además, el estudio adopta el enfoque "de la tala a la puerta", lo que significa que considera las emisiones de carbono hasta el punto de entrega del producto final, pero no incluye la fase de siembra, de uso y el fin de la vida útil de la madera. Las emisiones asociadas con la degradación o el reciclaje de la madera no se contemplan en este análisis, lo que podría proporcionar una comprensión incompleta del impacto ambiental total.

El tiempo y los recursos disponibles para la investigación también son factores limitantes. La profundidad y la amplitud del análisis están condicionadas por el tiempo asignado para completar la tesis,

lo que puede restringir la posibilidad de realizar un estudio más exhaustivo que incluya una muestra más grande de especies o un análisis más detallado de las etapas individuales del ciclo de vida.

Finalmente, el alcance geográfico del estudio está confinado a Costa Rica, a una finca y empresa en específico, y aunque esto proporciona información valiosa para la política y las prácticas locales, los hallazgos pueden no ser directamente transferibles a otros contextos regionales o internacionales debido a diferencias en prácticas de manejo forestal, tipos de madera y condiciones ambientales.

En resumen, mientras la investigación se propone avanzar significativamente en la comprensión del impacto ambiental de la producción de madera en Costa Rica, estas limitaciones subrayan la necesidad de interpretar los resultados con cautela y de considerar futuros estudios que puedan expandir y profundizar en las áreas que este proyecto no ha podido abordar por completo.

Antecedentes y estado de la cuestión

El desarrollo del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se originó casi simultáneamente en Estados Unidos y Europa. Si bien el primer ACV fue realizado en 1969 por el Midwest Research Institute (MRI) para la Coca-Cola, donde la premisa fundamental fue disminuir el consumo de recursos y, por lo tanto, disminuir la cantidad de emisiones al ambiente. Los estudios continuaron durante los años setenta, y grupos como Franklin Associates Ltd. junto con la MRI realizaron más de 60 análisis usando métodos de balance de entradas/salidas e incorporando cálculos de energía (Rodríguez, 2003).

En Europa, estudios similares se realizaron en la década de los sesenta. En Gran Bretaña, Lan Boustead realizó un análisis de la energía consumida en la fabricación de envases (de vidrio, plástico, acero y aluminio) de bebidas. Pero fue a partir de los años ochenta cuando la aplicación del ACV se incrementó. En esta misma década fue cuando se desarrollaron dos cambios importantes: primero, los métodos para cuantificar el impacto del producto en distintas categorías de problemas ambientales (tal como el calentamiento global y agotamiento de los recursos); y segundo, los estudios de ACV comenzaron a estar disponibles para uso público (Rodríguez, 2003).

La Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) es la principal organización que ha desarrollado y liderado las discusiones científicas acerca del ACV. En 1993, formuló el primer código internacional: Código de prácticas para el ACV (Code of Practice for Life Cycle Assessment), con el fin de homogeneizar los diversos estudios realizados para que siguieran una misma metodología. Esto impulsó el inicio de desarrollos masivos de ACV en diversas áreas de interés mundial, pues se realizaron conferencias, talleres y políticas sobre ACV (Rodríguez, 2003).

Posteriormente, la ISO apoyó este desarrollo para establecer una estructura de trabajo, uniformizar métodos, procedimientos, y terminologías, debido a que cada vez se agregaban nuevas etapas, se creaban metodologías, índices, programas computacionales dedicados a realizar ACV en plantas industriales, etc. La norma ISO 14040:1997 establece que “el ACV es una técnica para determinar los

aspectos ambientales e impactos potenciales asociados con un producto, lo cual se efectúa recopilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema; evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, e interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio” (Rodríguez, 2003)

A lo largo de los años se han desarrollado distintas metodologías, que han permitido realizar de una forma más ordenada y homogénea los estudios del análisis de ciclo de vida y por ende de la huella de carbono de los productos, entre las más representativas se encuentran:

- La norma ISO 14067. Se basa en gran medida en otras normas ISO existentes para ACV y se publicó en 2018. Puede considerarse el estándar de referencia internacional para la realización de la huella de carbono para los productos. (De Schryver & Zampori, 2022).
- Por otro lado, se encuentran estándares nacionales como PAS 2050, que fue desarrollado por el British Standards Institute (BSI). El PAS 2050 entró en vigor en octubre de 2008 y fue revisado en 2011. PAS 2050 es ampliamente utilizado y se considera el primer estándar de huella de carbono utilizado internacionalmente. (De Schryver & Zampori, 2022).
- El GHG Protocol Product Standard fue creado por el WRI/WBCSD y publicado en octubre de 2011. Fue desarrollado para ser consistente con la primera versión de PAS 2050, con la diferencia de que el GHG Protocol Product Standard incluye requisitos para la presentación de informes públicos. El protocolo GHG también proporciona normas adicionales para las evaluaciones corporativas y los cálculos relacionados con los proyectos (De Schryver & Zampori, 2022).

La norma ISO 14067, la PAS 2050 y el GHG Protocol son tres métodos fundamentales en el campo del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y la evaluación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), cada uno con enfoques distintos pero complementarios. Mientras que la ISO 14067 se centra específicamente en la cuantificación y comunicación de las emisiones de GEI asociadas con productos o servicios a lo largo de su ciclo de vida, proporcionando orientación detallada sobre este proceso, la PAS 2050 ofrece una

evaluación más amplia al considerar no solo las emisiones de GEI, sino también otros impactos ambientales significativos como el uso de recursos. Por otro lado, el GHG Protocol, compuesto por el Corporate Standard y el Product Standard, ofrece un marco más amplio y flexible para la contabilidad y reporte de emisiones de GEI, aplicable tanto a organizaciones como a productos, proporcionando así una orientación general para la evaluación de emisiones de GEI en diversos contextos y aplicaciones. En conjunto, estos tres métodos ofrecen una gama de herramientas y orientaciones para evaluar y abordar los impactos ambientales de productos y servicios, permitiendo a las organizaciones tomar decisiones más informadas y sostenibles en su cadena de suministro y operaciones.

En el tema de análisis de ciclo de vida y específicamente en la huella de carbono de los productos, a nivel internacional podemos encontrar estudios como el denominado “Life-cycle analysis of wood products: Cradle-to-Gate LCI of residential wood building materials” (Puettmann & Wilson, 2005). Este estudio compara la energía total y las emisiones principales desde la cuna hasta la puerta para la extracción de materias primas, la producción y el transporte de materiales de construcción de madera comunes a partir de los informes CORRIM 2004. Un inventario del ciclo de vida produjo las materias primas, incluyendo recursos de combustible y emisiones al aire, agua y suelo para madera laminada encolada, madera de pino seca en horno y verde, madera laminada contrachapada, contrachapado de pino y tablero de virutas orientadas. Entre los principales hallazgos de estas comparaciones se encontró que la producción de productos de madera, debido a la naturaleza de la industria, utiliza un tercio de su consumo de energía de fuentes renovables y el resto de los recursos no renovables basados en combustibles fósiles cuando se consideran los límites del sistema de regeneración y cosecha de bosques, producción de productos de madera y resina, y etapas de ciclo de vida del transporte. Cuando los límites del sistema se reducen a un modelo de puerta a puerta (etapa de ciclo de vida de fabricación) para los productos de madera, el componente de biomasa de la energía de fabricación aumenta a casi un 50% para la mayoría de los productos y hasta un 78% para la producción de madera en el Sureste. La etapa de ciclo de vida de

fabricación consumió la mayor cantidad de energía en todos los productos cuando se considera la resina como parte del proceso de producción. La extracción de recursos de troncos y el transporte de materias primas para la producción tuvieron el menor impacto ambiental (Puettmann & Wilson, 2005).

También en 2019, el artículo “Life Cycle Assessment of Forest-Based Products: A Review” (Sahoo et al., 2019). Se centra en el cambio climático, la degradación ambiental y la escasez de recursos son motivaciones para la gestión sostenible de los bosques. Los bosques, el recurso renovable más abundante en la Tierra, se utilizan para fabricar una amplia variedad de productos basados en madera para el consumo humano. Para proporcionar una medida científica de la sostenibilidad y el rendimiento ambiental de un producto, se utiliza el método de evaluación del ciclo de vida (ACV). Este artículo ofrece una revisión exhaustiva del rendimiento ambiental de productos basados en madera, que incluyen productos de construcción tradicionales, productos de construcción emergentes (madera laminada en masa) y nanomateriales utilizando el ACV atribucional. A lo largo de la cadena de suministro, la etapa de fabricación del ciclo de vida del producto tiende a tener los mayores impactos ambientales. Sin embargo, las actividades de gestión forestal y la logística tienden a tener el mayor impacto económico. Además, existen compensaciones ambientales cuando se regulan las emisiones, como indican los últimos ACV de productos de madera de construcción tradicionales. La interpretación de estos resultados de ACV puede guiar el desarrollo de nuevos productos utilizando biomateriales, futuros sistemas de construcción en masa y la formulación de políticas para mitigar el cambio climático. Los principales desafíos incluyen el manejo de las incertidumbres en la cadena de suministro y las complejas interacciones entre el medio ambiente, la conversión de materiales, el uso de recursos para la producción de productos y la cuantificación de las emisiones liberadas (Sahoo et al., 2019).

A nivel nacional destaca la tesis “Cálculo de huella de carbono para materiales de construcción en Costa Rica” (Badilla-Arroyo et al., 2015). Tesis de un conjunto de estudiantes de la Escuela de Arquitectura de la UCR, los cuales realizaron el cálculo de la huella de carbono de materiales tales como: varillas de

acero deformada #3, aluminio (perfiles para ventanería), baldosas prefabricadas de concreto (1.5m x 0.63m), bloques de concreto, columnas de concreto, fibrocemento, madera de construcción, madera laminada, vidrio 6mm. La madera analizada fue pino Caribe, se utilizó la metodología PAS 2050 y el GHG Protocol (Badilla-Arroyo et al., 2015).

También en el ámbito nacional, la investigación: “Comparación de la huella de carbono generada al construir las paredes de una vivienda unifamiliar de 45m² en obra gris, utilizando las emisiones calculadas al usar losas prefabricadas de concreto y al usar Teca” (Sáenz, 2015). Corresponde a una tesis de una estudiante de ingeniería Civil, en el cual se calcula la huella de carbono de los elementos mencionados en el título mediante la norma PAS 2050, en las conclusiones se destaca “más allá de que el concreto emita 1.92 ton de carbono y que las paredes en teca fijen 32ton ambas al construir la casa de 45m² es el poder demostrar como parte de los resultados que por ejemplo, tan solo con el 7% de todas las casas de interés social fueran en madera se podría compensar las emisiones de todo el sector” (Sáenz, 2015).

En el año 2016, también en el país se desarrolló el trabajo: “Metodología de medición de la huella de carbono para edificaciones en Costa Rica y su aplicación en el módulo habitacional Trópika.” (Solano Quesada & Ortiz Malavasi, 2016). En este trabajo se utilizó la norma ISO 14067 para estimar la huella de carbono, “La metodología seleccionada y la herramienta diseñada se aplicaron al caso del módulo habitacional Trópika. Este es un prototipo de vivienda diseñado y construido por estudiantes del Tecnológico de Costa Rica para participar en la competencia internacional sobre diseño y construcción sostenible, Solar Decathlon Europe 2014. Se elaboró un análisis de ciclo de vida parcial, de la cuna a la construcción, para Trópika. La hoja de cálculo preparada estimó un total de 28 ton CO₂e de carbono incorporado en la vivienda de 81 m² de construcción, o 345 kg CO₂e por m² de superficie útil. La fijación de carbono fue de 15 ton CO₂e y el balance final de emisiones de 13 ton CO₂e. Estos resultados fueron

validados comparándolos con los obtenidos en otras herramientas como SimaPro V.7.3.3, así como datos de la literatura (Solano Quesada & Ortiz Malavasi, 2016).

En 2018, Paola Cerdas Ramírez desarrolló el estudio "Elaboración de una Declaración Ambiental de Producto para un Tablame Premium de Maderas Cultivadas de Costa Rica". Utilizando la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) conforme a las normas ISO 14025, ISO 14040, y ISO 14044, el análisis cubrió desde la producción de plántulas hasta el transporte al punto de venta. Los principales impactos ambientales identificados fueron el uso de fertilizantes nitrogenados, la generación de calor para el secado de la madera y el consumo de electricidad y diésel, destacando la fijación de carbono como un beneficio significativo (Cerdas Ramírez, 2018).

John Solano Salmerón, en su estudio "Impacto potencial sobre el cambio climático de las tarimas de madera elaboradas en la Región Huetar Norte de Costa Rica a través de un Análisis de Ciclo de Vida (ACV)", comparó tarimas de madera local con aquellas de pino chileno importado. Los resultados mostraron que las tarimas de madera local emitían entre 25.87 y 29.25 kg de CO₂-eq por tarima, reduciendo el impacto a 19 kg CO₂-eq por tarima después de considerar el carbono almacenado (Solano Salmerón, 2018).

Por último, es importante mencionar que en el país se realizan constantemente estudios de análisis de ciclo de vida, pero en otras industrias y no tan común en el sector construcción, y mucho menos en materiales como la madera o sus derivados. De ahí que se puede notar que las referencias nacionales no son de años recientes, sino aportes puntuales hace ya más de ocho años y algunos casos.

Marco Teórico

El presente capítulo establece el marco teórico necesario para comprender la investigación que se lleva a cabo en esta tesis, que se centra en la estimación de la huella de carbono de tres especies forestales utilizadas en Costa Rica, aplicando un enfoque de Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Este marco teórico se divide en las siguientes secciones:

Conceptos:

Huella de Carbono

La huella de carbono (HdC) es una medida del impacto ambiental de una actividad, producto o servicio, expresada en términos de dióxido de carbono equivalente (CO₂e). El CO₂e es una unidad que permite comparar las emisiones de diferentes gases de efecto invernadero (GEI), teniendo en cuenta su potencial de calentamiento global. Los GEI, definidos en el protocolo de Kioto el año 1997, forman una capa permanente en la parte media de la atmósfera que impide que toda la radiación solar que es devuelta por la tierra pueda salir, provocando con ello que la temperatura bajo la capa aumente. (Espíndola & Valderrama, 2012)

La huella de carbono se calcula a partir de las emisiones de gases de efecto invernadero que se producen durante todo el ciclo de vida de una actividad, producto o servicio. El ciclo de vida incluye las siguientes etapas:

Extracción de materias primas: Incluye las emisiones que se producen para extraer las materias primas necesarias para producir el producto o servicio.

Fabricación: Incluye las emisiones que se producen para fabricar el producto o servicio.

Distribución: Incluye las emisiones que se producen para transportar el producto o servicio desde el lugar de fabricación hasta el lugar de consumo.

Uso: Incluye las emisiones que se producen durante el uso del producto o servicio.

Fin de vida: Incluye las emisiones que se producen para desechar el producto o servicio.

Para efectos de esta investigación se analizarán los primeros dos puntos del ciclo de vida.

La huella de carbono se puede calcular utilizando diferentes métodos. El método más utilizado es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), que es una metodología que permite evaluar el impacto ambiental de un producto o servicio a lo largo de todo su ciclo de vida.

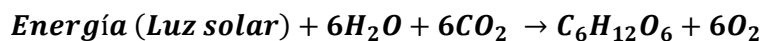
Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una metodología integral para evaluar el impacto ambiental de un producto o servicio a lo largo de todas las etapas de su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. La norma ISO 14040:1997 establece que “el ACV es una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados con un producto, lo cual se efectúa recopilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema; evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, e interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio” (Rodríguez, 2003) En este contexto, el ACV se presenta como una herramienta crucial para evaluar la huella de carbono de las especies forestales seleccionadas.

La madera y el carbono

La madera es un material de construcción tradicional y sostenible utilizado en todo el mundo. En el contexto costarricense, la industria de la construcción ha empleado diversas especies forestales, cada una con sus propias características y propiedades. Es esencial comprender la relevancia de la madera como material de construcción y cómo influye en las emisiones de GEI a lo largo de su ciclo de vida. “La biomasa contenida en los bosques y otras vegetaciones afecta el ciclo del carbón, removiendo carbón de la atmósfera mediante el proceso de fotosíntesis. El proceso convierte dióxido de carbono y agua en azúcares para el crecimiento del árbol, y libera oxígeno a la atmósfera” (Forest Products Laboratory, 1987).

En la siguiente reacción química se demuestra como los árboles fijan carbono en su estructura y a su vez liberan oxígeno:



Fuente: (Forest Products Laboratory, 1987)

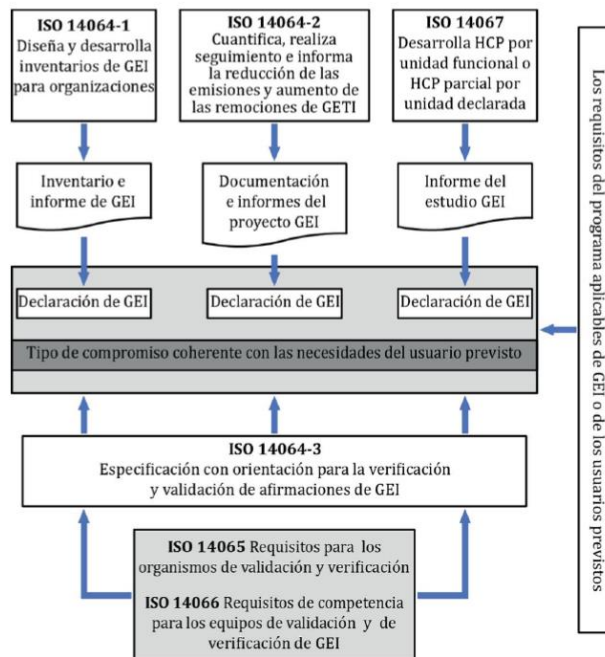
“El carbón en la madera permanece almacenado hasta que la madera se deteriore o sea quemada. Un árbol que permanece en el bosque y muere liberar una porción de su carbón de vuelta en la atmosfera mientras su materia se descompone. Por otro lado, si el árbol es usado para producir madera o productos de papel, esos productos almacenan el carbono mientras estén en uso.” (Forest Products Laboratory, 1987)

Normativa

En el contexto de esta tesis, se hace referencia a la norma INTE/ISO 14067:2019 Gases de efecto invernadero – Huella de carbono de productos – Requisitos y directrices para cuantificación (INTECO, 2019), que tal y como lo menciona el nombre proporciona pautas y requisitos para la cuantificación de la huella de carbono de productos; la escogencia de esta norma, y por ende de la metodología se debe también a la utilización de una norma internacional que cuenta con estandarización nacional.

Las normas ISO en materia de análisis de ciclo de vida son una familia que abarcan distintas ramas, la siguiente figura lo resumen:

Figura 2.
Interrelación Normas ISO



Fuente: (INTECO, 2019)

La norma establece que para la estimación de la huella de carbono de un producto se debe seguir una regla de categoría de producto (RCP) que se define como: conjunto de reglas específicas, requisitos y guías para el desarrollo de declaraciones ambientales tipo III y las comunicaciones de huellas para una o más categorías de producto. (INTECO, 2019)

Software

SIMAPRO es un software de análisis del ciclo de vida (ACV) desarrollado por PRé Sustainability, una empresa de software con sede en los Países Bajos. El software SimaPro, que es una herramienta comúnmente utilizada por empresas, organizaciones gubernamentales y organizaciones sin fines de lucro para evaluar el impacto ambiental de sus productos, servicios y procesos. Cuenta con diversas bases de datos tales como: Agri-footprint, ecoinvent v3 database, base de datos de entradas y salidas de Estados

Unidos y Dinamarca, Industry data 2.0 y USLCI. (simapro.com, 2023). SimaPro se basa en la norma ISO 14040:2018, que establece los requisitos para el cálculo, la verificación y el reporte de la huella de carbono. Esto ha contribuido a la estandarización del ACV, lo que facilita la comparación de los resultados de diferentes estudios.

Investigaciones Relacionadas

A nivel internacional el artículo con título “life-cycle analysis of wood products: Cradle-to-Gate LCI of residential wood building materials” (Puettmann & Wilson, 2005) presenta un análisis del ciclo de vida (ACV) de los productos de madera residenciales comunes, desde la cuna hasta la puerta.

El estudio de Puettmann y Wilson se centró en cinco productos de madera residenciales comunes:

- Madera de construcción aserrada de pino de la costa sur
- Madera de construcción aserrada de pino de la costa sureste
- Madera de construcción aserrada de pino del interior
- Madera contrachapada de pino
- Tablero de virutas orientadas (OSB)

Los autores analizaron el impacto ambiental de cada producto en términos de consumo de energía, emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y otros contaminantes del aire. Los resultados del estudio mostraron que la producción de productos de madera residenciales consume una cantidad significativa de energía. Sin embargo, la mayoría de esta energía proviene de fuentes renovables, como la biomasa forestal. En cuanto a las emisiones de GEI, el estudio encontró que la producción de productos de madera residenciales produce una cantidad relativamente baja de emisiones. De hecho, las emisiones de GEI asociadas con la producción de productos de madera residenciales son significativamente menores que las emisiones de GEI asociadas con la producción de materiales de construcción alternativos, como el acero y el hormigón.

Los autores del estudio concluyeron que los productos de madera residenciales tienen un impacto ambiental relativamente bajo, en comparación con otros materiales de construcción. Los autores también señalaron que los productos de madera residenciales ofrecen una serie de beneficios ambientales, como el almacenamiento de carbono y la reducción del consumo de energía durante el uso.

El estudio de Puettmann y Wilson es un importante aporte a la literatura sobre el impacto ambiental de los productos de madera. El estudio proporciona información valiosa que puede utilizarse para promover el uso de productos de madera sostenibles en la construcción.

El artículo "Life Cycle Assessment of Forest-Based Products: A Review" de Kamalakanta Sahoo et al. presenta una revisión de los estudios de análisis del ciclo de vida (ACV) de productos forestales. La revisión de Sahoo et al. cubre una amplia gama de productos forestales, incluyendo madera, papel, muebles y bioenergía. Los autores analizan el impacto ambiental de estos productos en términos de consumo de energía, emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y otros contaminantes del aire.

Los resultados de la revisión muestran al igual que las investigaciones mencionadas arriba, que los productos forestales tienen un impacto ambiental menor que los productos fabricados con materiales no renovables, como el acero y el hormigón. Esto se debe a que la madera, la materia prima principal de los productos forestales, es un recurso renovable.

Sin embargo, la revisión también muestra que el impacto ambiental de los productos forestales puede variar significativamente dependiendo de cómo se produzcan y utilicen. Por ejemplo, los productos forestales producidos con métodos de tala sostenible y utilizados de manera eficiente tienen un impacto ambiental menor que los productos forestales producidos con métodos de tala insostenible y utilizados de manera ineficiente. Los autores de la revisión concluyen que el ACV es una herramienta importante para evaluar el impacto ambiental de los productos forestales y para identificar oportunidades para reducir su impacto.

A nivel nacional se tiene como referencia la tesis "Cálculo de huella de carbono para materiales de construcción en Costa Rica" de Paula Badilla-Arroyo, José Andrés Elizondo-Santiago, Tatiana Fernández-Martínez, Fabricio Mora-Solano, Jorge Méndez-Trejos y Marcela Quesada-Yamasaki; la cual presenta un estudio de análisis del ciclo de vida (ACV) para evaluar el impacto ambiental de los materiales de construcción utilizados en Costa Rica.

El estudio de Badilla-Arroyo et al. se centró en el impacto ambiental de los materiales de construcción más utilizados en Costa Rica, incluyendo la madera, el hormigón, el acero y el vidrio. Los autores analizaron el impacto ambiental de cada material en términos de consumo de energía, emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y otros impactos ambientales.

Los resultados del estudio mostraron que los materiales de construcción tienen un impacto ambiental significativo. Los materiales más intensivos en carbono son el hormigón y el acero, mientras que los materiales más sostenibles son la madera y madera laminada. Los autores de la tesis concluyeron que es importante evaluar el impacto ambiental de los materiales de construcción para promover el uso de materiales más sostenibles.

Sobre este mismo tema, en el Tecnológico de Costa Rica, se desarrolló el trabajo: "Metodología de medición de la huella de carbono para edificaciones en Costa Rica y su aplicación en el módulo habitacional Trópika." de Silvia Solano Quesada y Edgar Ortiz Malavasi presenta una metodología para medir la huella de carbono de edificaciones en Costa Rica.

La metodología propuesta por Solano Quesada y Ortiz Malavasi se basa en el análisis del ciclo de vida (ACV), el estudio se centró en la aplicación de la metodología propuesta en el módulo habitacional Trópika, un prototipo de vivienda diseñado y construido por estudiantes del Tecnológico de Costa Rica para participar en la competencia internacional Solar Decathlon Europe 2014.

Los resultados del estudio mostraron que el módulo habitacional Trópika tiene una huella de carbono de 28 toneladas de CO₂e, lo que corresponde a 350 kg de CO₂e por metro cuadrado de superficie

útil. Los autores del estudio concluyeron que la metodología propuesta es una herramienta útil para medir la huella de carbono de edificaciones en Costa Rica.

A nivel de análisis de huella de carbono también se han hecho investigaciones de componentes de construcción como el que se desarrolla en la tesis "Comparación de la huella de carbono generada al construir las paredes de una vivienda unifamiliar de 45m² en obra gris, utilizando las emisiones calculadas al usar losas prefabricadas de concreto y al usar Teca" de Stuart Sáenz presenta un estudio de análisis del ciclo de vida (ACV) para comparar el impacto ambiental de dos materiales de construcción para paredes de viviendas unifamiliares: losas prefabricadas de concreto y madera de teca.

El estudio de Sáenz se centró en el impacto ambiental de los dos materiales en términos de consumo de energía, emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y otros impactos ambientales. Los resultados del estudio mostraron que la madera de teca tiene un impacto ambiental menor que las losas prefabricadas de concreto. Esto se debe a que la madera de teca es un material renovable, mientras que el concreto no lo es, y además requiere mucha mayor energía para producirse. El autor de la tesis concluye que la madera de teca es una alternativa ambientalmente sostenible para la construcción de paredes de viviendas unifamiliares.

En 2018, Paola Cerdas Ramírez desarrolló en Costa Rica el trabajo titulado "Elaboración de una Declaración Ambiental de Producto para un Tablame Premium de Maderas Cultivadas de Costa Rica", como parte de su proyecto final de graduación en la carrera de Ingeniería Ambiental en el Instituto Tecnológico de Costa Rica. Este estudio se centró en la evaluación del impacto ambiental de la producción de Tablame Premium utilizando la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) conforme a las normas ISO 14025, ISO 14040, y ISO 14044. El análisis cubrió todas las etapas del ciclo de vida del producto, desde la producción de plántulas hasta el transporte al punto de venta. Los resultados mostraron que los principales impactos ambientales se debieron al uso intensivo de fertilizantes nitrogenados, la generación de calor para el secado de la madera y el consumo de electricidad y diésel. La fijación de carbono resultante

de la madera fue destacada como un beneficio ambiental significativo, contribuyendo a la mitigación del cambio climático y ofreciendo una ventaja comparativa en el mercado frente a materiales de construcción alternativos (Cerdas Ramírez, 2018).

El trabajo de John Solano Salmerón titulado "Impacto potencial sobre el cambio climático de las tarimas de madera elaboradas en la Región Huetar Norte de Costa Rica a través de un Análisis de Ciclo de Vida (ACV)" se centra en evaluar las tarimas de madera producidas en Costa Rica, específicamente en la región Huetar Norte, en términos de sus emisiones de gases de efecto invernadero y su almacenamiento de carbono. El estudio compara las tarimas hechas con madera local con aquellas fabricadas de pino chileno importado. Los resultados revelan que las tarimas de madera local tienen un mejor desempeño ambiental en términos de cambio climático en el corto plazo, dado que emiten entre 25.87 y 29.25 kg de CO₂-eq por tarima, que es sustancialmente menor después de considerar el carbono almacenado en el producto. Este almacenamiento reduce el impacto a 19 kg CO₂-eq por tarima (Solano Salmerón, 2018).

Marco Legal y Regulatorio

El Acuerdo de París

El Acuerdo de París es un tratado internacional sobre el cambio climático adoptado en diciembre de 2015 en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP21) celebrada en París, Francia. El acuerdo entró en vigor en noviembre de 2016 y es jurídicamente vinculante para los 197 países que lo han ratificado.

El objetivo central del Acuerdo de París es limitar el aumento de la temperatura media mundial a muy por debajo de 2 grados Celsius con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar el aumento a 1,5 grados Celsius. Para ello, los países se comprometen a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a un ritmo y una profundidad sin precedentes.

El marco regulatorio del Acuerdo de París se compone de los siguientes elementos principales:

- **Objetivos nacionales de reducción de emisiones:** Cada país debe establecer un objetivo nacional de reducción de emisiones para 2025 y 2030. Estos objetivos deben ser ambiciosos y compatibles con el objetivo de limitar el aumento de la temperatura global.
- **Mecanismos de mercado:** Los países pueden utilizar mecanismos de mercado para ayudar a reducir sus emisiones. Estos mecanismos incluyen el comercio de emisiones, el desarrollo de proyectos de mitigación y la compensación de emisiones.
- **Apoyo financiero:** Los países desarrollados se comprometen a proporcionar apoyo financiero a los países en desarrollo para que puedan reducir sus emisiones.
- **Mecanismos de facilitación de la acción:** El Acuerdo de París establece una serie de mecanismos para ayudar a los países a cumplir sus objetivos de reducción de emisiones. Estos mecanismos incluyen el Fondo Verde para el Clima, el Centro de Tecnología y Capacidades y el Mecanismo de Transparencia.

Plan Nacional de Descarbonización

El Plan Nacional de Descarbonización (PND) es un plan estratégico de largo plazo para alcanzar la neutralidad de carbono en Costa Rica para el año 2050. El PND fue aprobado por el Gobierno de Costa Rica en 2019.

El objetivo de alcanzar la neutralidad de carbono en 2050 es un objetivo claro y ambicioso que proporciona una orientación para la acción climática. Las acciones se presentan en 10 ejes sectoriales con paquetes de políticas en tres periodos: inicio (2018-2022), inflexión (2023- 2030) y despliegue masivo (2031-2050), y 8 Estrategias transversales para potenciar el cambio (Gobierno de Costa Rica, 2019b).

Contribución Nacional Determinada Costa Rica

La Contribución Nacional Determinada (NDC) de Costa Rica es un plan de acción climática presentado por el país ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

(CMNUCC). La NDC de Costa Rica fue aprobada por el Gobierno de Costa Rica en 2020 y tiene como objetivo que “Costa Rica se compromete a un máximo absoluto de emisiones netas en el 2030 de 9.11 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂e) incluyendo todas las emisiones y todos los sectores cubiertos por el Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero correspondiente. Esta meta es consistente con la trayectoria del Plan Nacional de Descarbonización, la Estrategia de Largo Plazo presentada por Costa Rica en 2019, que busca emisiones netas cero en 2050 y es a su vez consistente con la trayectoria de 1.5 °C.” (Gobierno de Costa Rica, 2020)

Directriz n°050-MINAE

La Directriz n°050-MINAE "Directriz para la construcción sostenible en el sector público" es un instrumento normativo que establece los lineamientos para la construcción sostenible en el sector público de Costa Rica. La directriz fue aprobada en 2019 y tiene como objetivo promover la aplicación de prácticas de construcción sostenible en los edificios de toda la Administración Pública, tanto en aquellos que se vayan a construir como en los edificios existentes que se vayan a ampliar, adecuar, rehabilitar, renovar, mejorar, mantener o remodelar.

Marco Metodológico

Para alcanzar los objetivos planteados y poner a prueba la hipótesis “La huella de carbono de la madera está relacionada con las etapas específicas de la cadena de suministro y el traslado del material; y no únicamente con las características intrínsecas de las especies”, se llevará a cabo la siguiente metodología:

Revisión Bibliográfica:

Se realizó una recopilación de recursos mediante una revisión exhaustiva de la literatura científica y técnica relacionada con el análisis de huella de carbono, el análisis de ciclo de vida y los estudios previos relevantes en el contexto de Costa Rica y el mundo. Esto permitió establecer una base sólida de conocimiento y recopilar datos e información relevante.

Luego se llevó a cabo una selección de fuentes relevantes con el objetivo de evaluar críticamente cada una para determinar su relevancia y calidad en función de los objetivos de la tesis. Posteriormente, se organizó la información para clasificar las fuentes de literatura en categorías o temas específicos que aborden aspectos particulares del tema de investigación.

Se realizó un análisis y síntesis de cada fuente de literatura con el propósito de identificar tendencias, patrones, brechas en el conocimiento y hallazgos relevantes. También se documentaron los hallazgos clave de cada fuente, incluyendo citas relevantes y resúmenes de los puntos más importantes. Por último, se sintetizó la información recopilada en el apartado antecedentes y estado de la cuestión.

Una vez realizado el trabajo documental se precedió a trabajar en los objetivos en el siguiente orden:

Base de Datos:

Primeramente, se seleccionaron tres especies forestales a analizar en esta investigación, esto fundamentado en criterios comerciales que reflejan la relevancia de estas especies en la industria de la construcción en Costa Rica. La selección de las especies permite una representación de las especies más

comercializadas por la empresa Ecomundo S.R.L. a la fecha de esta investigación. La diversificación de las especies aborda la variabilidad en la oferta y la demanda, considerando aspectos como la disponibilidad, el costo y las preferencias del mercado. Asimismo, la inclusión de tres especies proporciona una visión más integral de la industria, permitiendo comparaciones significativas entre las huellas de carbono de diferentes materiales de construcción madereros. Esta decisión estratégica busca no solo abordar la variabilidad comercial, sino también proporcionar recomendaciones más robustas y adaptadas a las complejidades del contexto de la construcción en Costa Rica.

Se recopilaron los datos disponibles sobre cada fase del ciclo de vida de las especies forestales seleccionadas. Esto incluyendo información sobre la tala, la extracción de materias primas, el procesamiento y el transporte. Se utilizaron fuentes diversas, como registros forestales, plan de manejo forestal, datos suministrados por empresas y entrevistas con actores clave.

Se recopilan datos de tala y extracción de las especies forestales seleccionadas, incluyendo métodos, ubicaciones, volúmenes y prácticas de manejo forestal, esto como primer grupo de datos. Luego se obtienen datos sobre cómo se transportan la materia prima desde las áreas de tala hasta las instalaciones de procesamiento, incluyendo distancias, medios de transporte utilizados y emisiones asociadas. Por último, se recopilan los datos de procesamiento, con información tal como las máquinas de procesamiento, las tecnologías utilizadas, la potencia de los equipos, los productos finales y cualquier proceso que influya en las emisiones asociadas a esta fase del ciclo de vida.

Se normalizarán los datos, asegurando que los datos recopilados sean coherentes y comparables entre las diferentes fases del ciclo de vida. Puede ser necesario aplicar factores de corrección o conversiones para lograr esta normalización. Posteriormente, se organizó la base de datos en una estructura que permitiera almacenar y organizar los datos recopilados de manera eficiente, asegurando la accesibilidad y la integridad de la información.

Por último, se genera un resumen técnico, que describe en detalle cada fase del ciclo de vida, los datos recopilados y los hallazgos relevantes; esto para que pueda ser revisado por concedores del tema y pueda garantizar la precisión y la calidad de la base de datos.

Estimación del dióxido de carbono (CO₂) fijado en cada especie de madera

La estimación de la cantidad de dióxido de carbono (CO₂) fijado en cada especie de madera, a través del cálculo del carbono acumulado en la biomasa, fue llevada a cabo mediante una metodología detallada. Primeramente, se realizó una búsqueda de referencias para obtener la densidad de cada especie de madera, necesario para calcular la biomasa y, por ende, el carbono acumulado en cada especie de madera.

A través de técnicas analíticas, se determinó el contenido de carbono, permitiendo una estimación precisa del carbono fijado en cada especie. Utilizando estos datos junto con los parámetros, se realizó el cálculo del carbono acumulado en la biomasa de cada especie, teniendo en cuenta las unidades de medida pertinentes.

Los resultados obtenidos se asignaron a la unidad de funcional determinada para el análisis de ciclo de vida, asegurando que fueran relevantes y aplicables al contexto específico de estudio. Para validar los resultados, se compararon con estudios previos y se aplicaron controles de calidad que garantizaron la confiabilidad de los datos obtenidos.

Finalmente, los resultados fueron documentados de manera clara y concisa, incluyendo las referencias utilizadas, los datos recopilados y cualquier suposición o limitación del estudio. La presentación de los resultados se realizó de manera que facilitara su interpretación y aplicación en el análisis de ciclo de vida.

Estimación de la Huella de Carbono:

Se considera la norma INTE/ISO 14067:2019 la cual establece que para el cálculo de la huella de carbono de debe utilizar una Regla de categoría de producto (PCR por sus siglas en ingles), la cual establece

los principios básicos de recopilación de datos, objetivos, alcance, límites del sistema, unidad funcional y validación de datos, para esta investigación se utilizará la regla de categoría “North American Structural and Architectural Wood Products” (FPInnovations, 2013), la selección de esta regla de categoría se basa en la recomendación del MSc. Luis Valerio Pérez, Director del Laboratorio de Ciclo de Vida y Economía Circular del Tecnológico de Costa Rica, esto debido a que la regla de categoría del EPD System no se encuentra disponible, debido a que está siendo actualizada.

Aplicando la metodología de la PCR, se procede a desglosar las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con cada etapa del ciclo de vida. Se utiliza el software especializado SimaPro 9.4.0.3, para el cual se realiza una coordinación entre la Maestría Diseño y Construcción Sostenible y la Escuela de Ingeniería Ambiental del Tecnológico de Costa Rica, específicamente con el laboratorio de Análisis de Ciclo de Vida, para realizar estos cálculos de huella de carbono.

Se tabulan y acotan los datos del paso 2 para garantizar que sean comparables y consistentes entre las etapas y las especies forestales, y se categorizan las emisiones en función de las etapas del ciclo de vida. Después se documenta detalladamente los procedimientos utilizados, los datos recopilados y los resultados obtenidos mediante el software en un informe técnico. Asegurarse de que el informe cumpla con los requisitos de la norma INTE/ISO 14067:2019.

Este proceso se llevó a cabo con la tutoría del encargado del Laboratorio de Análisis de Ciclo de Vida, para revisar y validar en la medida de lo posible la salida del programa y con esto garantizar la precisión y la calidad de los resultados.

Determinación de las principales fuentes de emisiones de carbono

Después de llevar a cabo la meticulosa estimación de la huella de carbono, se procedió a realizar una exhaustiva comparación de los resultados obtenidos de las tres especies forestales en estudio. El objetivo era identificar las variables que incidían de manera más cuantiosa en términos de emisiones de

gases de efecto invernadero, profundizando en el análisis para determinar si las características intrínsecas de cada tipo de especie ejercían una influencia significativa en el resultado global.

Para representar visualmente los datos recopilados, se emplearon gráficos y tablas que permitieron no solo identificar tendencias y patrones, sino también facilitar la comprensión de las diferencias entre las especies. Este enfoque visual fue esencial para evaluar de manera clara las áreas que presentaban mayores oportunidades de mejora en términos de reducción de emisiones a lo largo de la cadena de suministro.

Una vez analizados los resultados, se procedió a documentar de manera detallada y precisa los hallazgos de este análisis comparativo. Se identificaron las áreas específicas de la cadena de suministro que contribuían de manera significativa a la huella de carbono, proporcionando así un mapa claro de los puntos críticos. Estas áreas, identificadas como elementos clave en la generación de emisiones, fueron consideradas como objetivos prioritarios para implementar mejoras y reducir de manera efectiva las emisiones de gases de efecto invernadero.

El documento resultante no solo ofreció una evaluación exhaustiva de la huella de carbono de las especies forestales estudiadas, sino que también contenía recomendaciones y acciones futuras específicas. Estas sugerencias estaban enfocadas en estrategias prácticas para mejorar el impacto ambiental, proponiendo medidas concretas y viables que podían implementarse en la cadena de suministro para alcanzar una reducción significativa de las emisiones. En última instancia, el objetivo fue contribuir a la sostenibilidad ambiental a través de la optimización de procesos y prácticas dentro de la cadena de suministro de las especies forestales analizadas.

Resultados

Conformación de la Base de Datos

A continuación, se muestran los datos recopilados para realizar una estimación de la huella de carbono de tres especies forestales en Costa Rica. Los datos sobre los procesos de extracción de materia prima provienen de la finca localizada en el distrito de Acapulco, cantón de Puntarenas, durante el año 2023. Esta finca, denominada Sardinal y abarcando un área de 583,3 hectáreas, se sitúa a una distancia significativa de 93.0 kilómetros de la industria, factor relevante para el cálculo de las emisiones asociadas al transporte.

Paralelamente, los datos referentes a la fase de industrialización se han obtenido del aserradero de Ecomundo SRL, situado en Rincón de Arias, Grecia, Alajuela, también correspondientes al año 2023. Este aserradero juega un papel crucial en la transformación de la materia prima en productos listos para el mercado de la construcción y, por ende, en la configuración de la huella de carbono de los productos finales.

La obtención de los datos para cada etapa de la cadena de valor se realizó mediante entrevistas con personal clave y revisión de documentos pertinentes. Por ejemplo, para la fase de extracción, se entrevistó al encargado de extracción el Sr. Cristian Chavarría y se consultó el informe de manejo forestal de la finca (en los apéndices de detalla más información al respecto). Para el transporte, se recabaron datos específicos de capacidad por tipo de camión a través de entrevistas con el mismo Sr. Chavarría, y se empleó Google Maps para calcular la distancia entre la finca y la industria. En cuanto a la industrialización, se realizó una entrevista con el Encargado de Industrialización, el Ingeniero Luis Brenes, y se procedió a un levantamiento de equipos en el aserradero de Ecomundo.

La metodología detallada y las fuentes específicas de la información recabada serán expuestas y discutidas con mayor profundidad en el capítulo siguiente como parte del desarrollo de la regla de

categoría del producto, proporcionando así una comprensión integral de los métodos utilizados para la recopilación de datos y las bases sobre las que se asienta el análisis de la huella de carbono en este estudio.

Abordando cada fase del ciclo de vida, es importante mencionar que debido a que el proceso de extracción, transporte y procesamiento es el mismo para las distintas especies forestales industrializadas en la empresa, se toma el análisis de ciclo de vida como igual indiferentemente de la especie, lo que si va a denotar una diferencia en cuanto a la huella de carbono final será el dióxido de carbono capturado por cada tipo de madera, dado que es una propiedad que está en función de la densidad del material. Esta investigación abarca desde la fase inicial de tala y extracción de materias primas hasta las etapas subsiguientes de transporte y procesamiento, proporcionando un panorama integral de la cadena de suministro de estas maderas, en lo que es denominado un alcance extracción a la puerta.

Durante la fase de recopilación de datos, se puso un énfasis significativo en la obtención de información precisa y específica para cada etapa del ciclo de vida. Este enfoque garantiza no solo la representación fiel de los procesos involucrados en la extracción y manejo de las especies forestales, sino también la creación de una base de datos precisa, lo anterior a pesar de la escasez de información encontrada durante esta investigación. La estructura organizativa de esta base de datos facilita la accesibilidad y el análisis de la información, permitiendo su utilización efectiva en futuras investigaciones, análisis de sostenibilidad y toma de decisiones informadas.

Cada fase del ciclo de vida ha sido meticulosamente documentada, incluyendo detalles específicos como las prácticas de tala empleadas, los métodos de extracción de materias primas, las modalidades de transporte utilizadas y los procesos exactos de transformación. Esta información no solo enriquece la comprensión de la cadena de suministro de las especies forestales, sino que también establece una base sólida para evaluaciones posteriores.

Para el cumplimiento del primer objetivo de esta investigación se procedió primeramente con la definición de las especies a investigar, dichas especies fueron seleccionadas con fundamentado en criterios

comerciales, mediante entrevista con el departamento de producción, así como de ventas de la empresa Ecomundo S.R.L. los cuales mediante sus registros indican que las maderas que han procesado más para el periodo 2023 respectivamente son: Guanacaste (*Enterolobium cyclocarpum*), Teca (*Tectona grandis*), Cedro (*Cedrela odorata*), Pochote (*Bombacopsis quinata*) y Cenizaro (*Samanea saman*).

Dado que la finca de la cual se realizó el levantamiento de datos no se extrae Teca, se excluye esta especie del análisis y, por ende, las tres especies analizadas son:

1. Guanacaste (*Enterolobium cyclocarpum*)

Figura 3.

Especie Forestal Guanacaste (Enterolobium cyclocarpum)



Fuente: (wikipedia.org, 2024b)

2. Cedro (*Cedrela odorata*)

Figura 4.

Especie Forestal Cedro (Cedrela odorata)



Fuente: (wikipedia.org, 2024a)

3. Pochote (*Bombacopsis quinata*)

Figura 5.

*Especie Forestal Pochote (*Bombacopsis quinata*)*



Fuente: (Monge Pérez & Loría Coto, s.f.)

Rendimientos

A continuación, se presentan los cuadros de datos que encapsulan los resultados y métricas claves obtenidas durante la investigación. Cada cuadro de datos se enfoca en una fase particular del ciclo de vida, desglosando aspectos cruciales como el rendimiento, equipos, modelos y los procesos específicos de transformación. La presentación estructurada de estos datos busca facilitar su interpretación y análisis, contribuyendo así a evaluaciones más profundas y a la identificación de oportunidades estratégicas para optimizar la cadena de suministro.

Cuadro 1.

Rendimientos de extracción de la madera

Etapa	Equipo	Modelo	Rendimiento	Unidad
Tala	Motosierra	Husqvarna 395 XP®	10 000 a 20 000	PMT / día
Extracción a Patio	Tractor	Cat D6	10 000 a 20 000	PMT / día

Fuente: (Chavarria, 2024)

Para el proceso de extracción se considera un desperdicio del **20%** (Chavarria, 2024)

Cuadro 2.

Rendimiento transporte de la madera

Etapa	Equipo	Modelo	Rendimiento	Unidad
Carga de Troza	Cargador	Cat 966	10 000	PMT / 3 horas
Transporte	Carreta	Freightliner Cascadia	10 000	PMT / Viaje

Fuente: (Chavarria, 2024)

Cuadro 3.

Rendimientos industrialización de la madera

Etapa	Equipo	Modelo	Rendimiento	Unidad
Descarga	Cargador	Cat 950 GC	10 000	PMT / 2.5 horas
Aserrío	Aserradero Ecomundo	N/A	67490	PMT / Mes
Saneo	Sierra	M243C	30 090	PMT / Mes
Acomodo en Bodega	Montacarga	GC030-040SVX	2 000	PMT / hora

Fuente: (Solis, 2024)

Para el proceso de industrialización se considera un desperdicio del **15%** (Solis, 2024)

Los cuadros presentados anteriormente se encuentran en unidades de pulgadas madereras ticas (PMT). Para realizar el análisis correspondiente, es necesario convertir las unidades a metros cúbicos (m^3).

Esta conversión se realiza utilizando el siguiente factor:

$$1 \text{ PMT} = 1" \times 1" \times 4 \text{ varas} \text{ (Muñoz-Acosta, 2012)}$$

Es decir:

$$1 \text{ PMT} = 0,0021677 \text{ m}^3 \text{ (Muñoz-Acosta, 2012)}$$

Tras la obtención de los cuadros previamente mencionados, se procede con la conversión de los datos a unidades métricas, específicamente a metros cúbicos por día. Se consideran 8 horas efectivas de trabajo por día, semanas de 5 días, meses de 4,33 semanas.

Para la producción de un metro cúbico de producto final, es crucial considerar los rendimientos de las distintas etapas del proceso productivo. Particularmente, las etapas de extracción e industrialización juegan roles significativos en la determinación de la cantidad inicial de materia prima requerida. Con base en los rendimientos específicos de estas etapas, se calcula que, para obtener 1 metro cúbico del producto final con un rendimiento del 85% en la etapa de industrialización, es necesario comenzar con aproximadamente 1,18 metros cúbicos de material. A su vez, teniendo en cuenta un rendimiento del 80% en la etapa de extracción, la cantidad inicial de materia prima necesaria se eleva a aproximadamente 1,47 metros cúbicos. Estos cálculos son esenciales para garantizar que, a pesar de las pérdidas inherentes a cada proceso, se alcance el volumen deseado en el producto final. Este enfoque contribuye a una evaluación más precisa del impacto ambiental asociado a la producción, además, con el objetivo de abordar la variabilidad inherente en los rendimientos, se decide adoptar por un enfoque conservador considerando los valores más bajos dentro de los rangos de rendimientos. Esta elección tiene como finalidad considerar el peor escenario, esto para minimizar el riesgo de subestimar los resultados.

La conversión se realiza con la siguiente ecuación:

Ecuación 1.

Rendimiento (SI)

$$= \text{Rendimiento} \times \text{Factor conversión PMT} \times (1 - \% \text{ desperdicio acumulado})$$

Donde:

- **Rendimiento** es el valor de los cuadros 1,2 o 3 en PMT/día.
- **Factor de conversión PMT** es igual a 0,0021677 PMT/m³
- **% desperdicio acumulado** para la etapa de extracción 35%, para la etapa de transporte 15% y para la etapa de industrialización hasta saneo 15%, Acomodo en Bodega 0%.

Cuadro 4.

Rendimientos de extracción de la madera (SI)

Etapa	Equipo	Modelo	Rendimiento	Unidad
Tala	Motosierra	Husqvarna 395 XP®	14,09	m ³ / día
Extracción a Patio	Tractor	Cat D6	14,09	m ³ / día

Fuente: (Chavarria, 2024)

Cuadro 5.

Rendimiento transporte de la madera (SI)

Etapa	Equipo	Modelo	Rendimiento	Unidad
Carga de Troza	Cargador	Cat 966	49,13	m ³ / día
Transporte	Carreta	Freightliner Cascadia	18,43	m ³ / viaje

Fuente: (Chavarria, 2024)

Cuadro 6.

Rendimientos industrialización de la madera (SI)

Etapa	Equipo	Modelo	Rendimiento	Unidad
Descarga	Cargador	Cat 950 GC	58,96	m ³ / día
Aserrío	Aserradero Ecomundo	N/A	5,74	m ³ / día
Saneamiento	Sierra	M243C	2,56	m ³ / día
Acomodo en Bodega	Montacarga	GC030-040SVX	34,68	m ³ / día

Fuente: (Solis, 2024)

Estos cuadros de datos no solo representan un compendio de resultados, sino que también sirven como herramientas dinámicas para la continuidad de la investigación y la implementación de mejoras continuas en términos de sostenibilidad y eficiencia en el ciclo de vida de las especies forestales seleccionadas.

La eficiencia y rendimiento en la actividad de tala de árboles se ven influidos por diversos aspectos, los cuales desempeñan un papel crucial en la optimización de esta fase del ciclo de vida de las especies forestales. Estos aspectos abarcan desde factores operativos hasta consideraciones medioambientales, y su comprensión es esencial para llevar a cabo prácticas de tala sostenibles y eficientes.

En primer lugar, la selección y aplicación de las técnicas de tala adecuadas son determinantes para el rendimiento general. La elección de métodos de tala que minimizan los impactos ambientales y maximizan el aprovechamiento de los recursos forestales es esencial. La formación y competencia del personal involucrado en la tala también desempeñan un papel significativo, ya que su destreza y conocimientos pueden influir en la rapidez y precisión de la operación.

Además, las condiciones topográficas y climáticas del entorno forestal son factores ineludibles. Terrenos difíciles pueden presentar desafíos logísticos, afectando el tiempo y esfuerzo requeridos para la tala. Factores climáticos, como las estaciones del año, también pueden incidir en la accesibilidad y eficiencia de la actividad de tala.

La utilización de tecnologías modernas, como maquinaria especializada y sistemas de posicionamiento global (GPS), puede mejorar significativamente los rendimientos al aumentar la precisión y eficiencia en la tala. La inversión en tecnologías avanzadas permite una planificación más precisa, reducción de residuos y mejor gestión de los recursos forestales.

La gestión sostenible y responsable de los bosques juega un papel fundamental en la optimización de los rendimientos a largo plazo. Prácticas como la regeneración forestal y la selección cuidadosa de árboles garantizan la continuidad del recurso y contribuyen a la salud a largo plazo del ecosistema.

En resumen, el rendimiento en la tala de árboles se ve influido por una intersección compleja de factores, desde la selección de técnicas y la formación del personal hasta las condiciones medioambientales y la implementación de tecnologías avanzadas. La consideración y gestión equilibrada de estos aspectos son fundamentales para lograr prácticas de tala eficientes y sostenibles, contribuyendo así a la gestión responsable de los recursos forestales y la reducción del impacto ambiental asociado.

Por otro lado, el transporte de madera entre Esparza y Grecia es un proceso que se puede tornar complejo, influenciado por la variada geografía y el clima tropical del país. Las condiciones climáticas adversas, junto con un terreno montañoso, pueden afectar significativamente la eficiencia del transporte, especialmente durante la temporada de lluvias, donde el riesgo de deslizamientos y el deterioro de las carreteras incrementan los desafíos logísticos, tanto en tiempos como en distancias de acarreo de la materia prima.

Por último, el rendimiento de un aserradero es influenciado por una compleja interacción de factores que van desde la calidad de la materia prima hasta las prácticas operativas y de gestión. La calidad de la madera que se procesa es fundamental; maderas de baja calidad o con defectos pueden aumentar los desechos y disminuir la eficiencia de producción, subrayando la importancia de una selección cuidadosa y una gestión forestal responsable.

La tecnología y el equipamiento son críticos para la operatividad del aserradero. Equipos modernos y bien mantenidos son esenciales para asegurar cortes precisos y aprovechamiento óptimo de la madera, mientras que el equipamiento obsoleto puede causar paradas no planificadas y afectar negativamente el rendimiento. Además, la eficiencia operativa, incluyendo la gestión de procesos y la logística, es clave para minimizar cuellos de botella y maximizar la productividad. Estrategias efectivas de planificación y coordinación pueden transformar la producción, haciendo un uso más eficiente de los recursos disponibles.

Insumos

En este apartado se establecen los insumos, conocidos también como “entradas” que contribuyen a la huella de carbono de la madera. Esta sección se dedica a detallar los datos esenciales que alimentan los cálculos, abarcando desde la extracción de materias primas hasta el procesamiento final de la madera, conforme a los lineamientos de la norma INTE/ISO 14067:2019 (ISO 14064-1:2018, 2018) y la aplicación de la Regla de categoría de producto (PCR) "North American Structural and Architectural Wood Products" (FPInnovations, 2013)

Las entradas incluyen, pero no se limitan a el uso de energía, las emisiones directas e indirectas de los procesos productivos, y los insumos materiales. Además, se toman en cuenta los aspectos específicos tales como desperdicio, eficiencia de los equipos, entre otros.

A continuación, se muestran los equipos utilizados en cada etapa, junto con su potencia nominal:

Cuadro 7.

Potencia equipos extracción de la madera

Equipo	Modelo	Potencia	Unidad
Motosierra	Husqvarna 395 XP®	7,1	HP
Tractor	Cat D6	215,0	HP

Cuadro 8.

Potencia equipos transporte de la madera

Equipo	Modelo	Potencia	Unidad
Cargador	Cat 966	321,0	HP
Carreta	Freightliner Cascadia	525,0	HP

Cuadro 9.*Potencia equipos industrialización de la madera*

Equipo	Modelo	Potencia	Unidad
Cargador	Cat 950 GC	225,0	HP
Aserradero Ecomundo	N/A	106,5	HP
Sierra	M243C	4,0	HP
Montacarga	GC030-040SVX	44,0	HP

Consumo Eléctrico

Para el cálculo del consumo eléctrico de los motores en la industria, y específicamente para el Aserradero y la Sierra, se considera la siguiente formula:

Ecuación 2.

$$kWh = \frac{HP \times 0,746 \frac{kW}{HP} \times \text{Tiempo de Operación (horas)}}{\text{Eficiencia del motor}}$$

Donde:

- **HP** es la potencia del motor en caballos de fuerza.
- **Tiempo de operación** es el número de horas que el motor opera, se considera el cálculo para 1 hora de operación.
- **Eficiencia del motor** se expresa como un decimal, se considera 0.8 para una eficiencia del 80% (Bose, 2002)

Utilizando la ecuación anterior, y realizando el cálculo para una hora de operación se obtiene el siguiente cuadro:

Cuadro 10.*Consumo Eléctrico*

Equipo	Modelo	Cantidad	Unidad
Aserradero Ecomundo	N/A	99,31	kWh/h
Sierra	M243C	3,73	kWh/h

Factor Eficiencia del Motor

La elección de un factor de eficiencia del 80% para motores eléctricos se basa en una consideración cuidadosa de diversos factores prácticos y técnicos asociados con el rendimiento promedio de estos motores en una amplia gama de aplicaciones industriales y comerciales. Un valor de eficiencia del 80% se considera conservador y realista, reflejando un equilibrio entre las expectativas de rendimiento y las condiciones operativas variadas. A continuación, se detallan las razones fundamentales que justifican la utilización de este valor de eficiencia:

Amplia Aplicabilidad: Un factor de eficiencia del 80% tiene en cuenta la diversidad de motores eléctricos disponibles en el mercado, incluyendo aquellos que no son de última generación o de alta eficiencia. Este valor es representativo de un buen rendimiento para una amplia variedad de motores, incluidos los de tecnologías más antiguas o aquellos que no han sido optimizados para alcanzar las máximas eficiencias posibles.

Consideraciones de Mantenimiento y Condiciones de Operación: El rendimiento de un motor eléctrico puede verse afectado por el mantenimiento y las condiciones de operación. Factores como el desgaste de los componentes, la acumulación de polvo y suciedad, y las variaciones en la carga pueden reducir la eficiencia de un motor. Un valor del 80% toma en cuenta estas condiciones realistas, proporcionando una estimación más precisa del rendimiento a lo largo del tiempo y bajo diferentes escenarios de uso.

Margen de Seguridad en Diseño y Planificación: Al utilizar un factor de eficiencia conservador del 80%, los ingenieros y planificadores pueden incorporar un margen de seguridad en el diseño y la planificación de sistemas energéticos. Esto asegura que, incluso si los motores no operan en su máxima eficiencia posible, el sistema en general todavía puede cumplir con los requisitos de rendimiento, evitando así subestimaciones que podrían llevar a déficits de energía o a un dimensionamiento inadecuado de los componentes.

Costo-Eficiencia: Mientras que los motores de alta eficiencia (con eficiencias superiores al 90%) pueden ofrecer ahorros significativos en el consumo de energía, también suelen tener un costo inicial más alto. Un factor de eficiencia del 80% refleja una consideración de costo-eficiencia, donde el costo inicial más bajo de los motores con eficiencias en este rango puede ser una opción más viable para muchas aplicaciones, especialmente cuando los costos operativos totales son considerados junto con el ahorro en consumo de energía.

El uso de un factor de eficiencia del 80% para motores eléctricos es una práctica prudente que equilibra expectativas de rendimiento con realidades operativas y económicas. Este enfoque conservador ayuda a garantizar que la planificación y el diseño de sistemas que incluyen motores eléctricos sean robustos, realistas y sostenibles, permitiendo una gestión eficiente de los recursos y la energía en una variedad de contextos industriales y comerciales.

Consumo Combustible (Gasolina y Diesel)

La fórmula general para estimar el consumo de combustible en galones por hora (GPH) basado en la potencia es la siguiente:

Ecuación 3.

$$GPH = \frac{HP \times \text{Factor de Carga}}{\text{Eficiencia del Combustible}}$$

Donde:

- **HP** es la potencia del motor en caballos de fuerza.
- **Factor de carga** es una estimación del porcentaje promedio de la potencia máxima que el motor utilizará durante su operación. Este factor puede variar dependiendo de la tarea; por ejemplo, un factor de 0.25 a 0.35 para operaciones ligeras, 0.35 a 0.6 para operaciones moderadas, y 0.6 a 0.8 para operaciones pesadas. (Peurifoy et al., 1996)

- **Especificación de eficiencia de combustible** es cuántos HP puede generar un motor por galón de combustible por hora. Un valor común utilizado para muchos cálculos es 18-20 HP por GPH para motores diésel. (Heywood, 1988)

Utilizando la ecuación anterior, y realizando el cálculo se obtiene el siguiente cuadro:

Cuadro 11.
Consumo Combustible (Gasolina y Diesel)

Equipo	Modelo	Factor de Carga	Eficiencia [HP/GPH]	Cantidad [GPH]
Motosierra	Husqvarna 395 XP®	0,75	10	0,53
Tractor	Cat D6	0,6	18	7,17
Cargador	Cat 966	0,6	18	10,70
Cargador	Cat 950 GC	0,6	18	7,50

Factor de Carga

El factor de carga es un parámetro esencial que se utiliza para estimar el consumo de energía o combustible de maquinaria y equipos en diversas operaciones. Este factor refleja el porcentaje promedio de la capacidad máxima a la que un equipo opera en condiciones típicas. La selección de un factor de carga específico para un tipo de equipo, como una motosierra, un tractor, o cargadores, depende de varios factores inherentes a su uso, eficiencia operativa y condiciones de trabajo. La elección de 0,75 para la motosierra y 0,6 para el tractor y los cargadores tiene sus fundamentos en el análisis de estas variables, y su comparación contra los datos indicados en las respectivas entrevistas realizadas en sitio.

La motosierra es una herramienta que, por su naturaleza de uso, tiende a operar a niveles de potencia relativamente altos durante su funcionamiento. Su diseño está orientado a cortes rápidos y eficientes, lo que implica un uso intensivo del motor cuando está en operación. Sin embargo, también hay momentos de inactividad o uso menos intensivo, como ajustes de posición o cortes más suaves. Un factor de carga de 0,75 sugiere que, en promedio, una motosierra opera al 75% de su capacidad máxima. Esto

refleja un equilibrio entre los momentos de alta demanda de potencia durante el corte activo y los períodos de menor exigencia o pausa.

Los tractores y cargadores, por otro lado, son equipos diseñados para una amplia gama de tareas agrícolas, de construcción o de manejo de materiales. Estos equipos pueden operar bajo condiciones variadas, desde labranza pesada, que requiere un alto uso de la potencia, hasta tareas más ligeras como transporte o carga y descarga de materiales. Un factor de carga de 0,6 indica que, en promedio, estos equipos trabajan al 60% de su capacidad máxima. Esta cifra toma en cuenta la diversidad de tareas realizadas y la variabilidad en la intensidad del uso. Por ejemplo, mientras un tractor puede estar trabajando a plena capacidad durante la labranza, su uso durante tareas de transporte o en espera entre tareas reduce el factor de carga promedio.

Eficiencia de Combustible

La selección de factores de eficiencia de combustible específicos se basa en una combinación de factores técnicos y prácticos relacionados con el rendimiento y la eficiencia de combustible de equipos en condiciones operativas reales. Para tractores y cargadores, se ha establecido un valor de 18 HP por galón/hora, mientras que para las motosierras se considera un valor de 10 HP por galón/hora. Estos valores son medidas de cuántos caballos de fuerza (HP) se pueden obtener por cada galón de combustible consumido por hora y son cruciales para calcular el consumo de combustible y la eficiencia operativa, esta estimación también fue corroborada con el Sr. Chavarría y se aproximan a los consumos que se manejan en la finca.

Fundamentos de la Eficiencia de Combustible:

Eficiencia Térmica y Mecánica: La eficiencia de combustible de cualquier motor depende de su eficiencia térmica (cómo convierte el combustible en energía) y de su eficiencia mecánica (cómo transfiere esa energía a trabajo útil). Las motosierras suelen operar con motores de gasolina de dos tiempos y están diseñadas para maximizar la potencia y eficiencia dentro de su rango de operación. Aunque no son tan

eficientes como los motores diésel, su diseño optimiza el rendimiento para las aplicaciones específicas para las que se utilizan.

Diseño y Tecnología del Motor: La tecnología del motor, incluyendo los sistemas de inyección de combustible y el control de emisiones, influye directamente en la eficiencia de combustible. Mientras los motores diésel de los tractores y cargadores se destacan por su durabilidad y eficiencia térmica en trabajos pesados, las motosierras requieren un enfoque distinto que atienda la potencia necesaria y la eficiencia en su ciclo operativo específico de dos tiempos.

Operación en Condiciones Variables: El factor de eficiencia de combustible refleja la capacidad del equipo para mantener un rendimiento óptimo a través de diferentes niveles de carga y operaciones. El valor de 18 HP por GPH para tractores y cargadores toma en cuenta operaciones desde moderadas hasta pesadas. En contraste, el valor de 10 HP por GPH para motosierras considera la naturaleza de sus tareas y su ciclo de operación distinto.

Razones para la Diferenciación:

Consistencia en la Estimación: Proporciona una base consistente para estimar el consumo de combustible, reconociendo las diferencias fundamentales entre los tipos de motores y equipos.

Equilibrio entre Potencia y Consumo: Los valores seleccionados reflejan un balance entre proporcionar la potencia necesaria para las tareas y mantener un consumo de combustible razonable.

Adaptabilidad a Diferentes Condiciones: Los valores asumen un nivel de eficiencia que es realista y aplicable para una variedad de condiciones operativas, desde el trabajo ligero hasta el más pesado, proporcionando así una guía útil para los operadores y gestores de flotas.

En resumen, mientras que para tractores y cargadores se utiliza un valor promedio de 18 HP por GPH para calcular de manera efectiva el consumo de combustible, para las motosierras se considera un factor de eficiencia de combustible de 10 HP por GPH. Esta distinción representa un equilibrio entre la

necesidad de potencia y eficiencia, considerando la tecnología del motor y las demandas operativas de cada tipo de equipo.

Consumo Aceite

La fórmula para calcular el consumo promedio de aceite (en galones por hora, GPH) es la siguiente:

Ecuación 4.

$$\text{Consumo GPH} = \frac{\text{Total de galones consumidos por jornada}}{\text{Número de horas de trabajo por jornada}}$$

Donde:

- **Total de galones consumidos por jornada:** Es la cantidad de combustible que el operario utiliza en un día de trabajo. Para este cálculo, se utiliza el dato proporcionado por el Sr. Chavarría de medio galón por día.
- **Número de horas de trabajo por jornada:** Es el total de horas que la motosierra está en funcionamiento durante el día de trabajo. En este caso, el operario trabaja una jornada de 8 horas.

Utilizando la ecuación anterior, y realizando el cálculo se obtiene el siguiente cuadro:

Cuadro 12.

Consumo Aceite

Equipo	Modelo	Consumo Aceite [GPH]
Motosierra	Husqvarna 395 XP®	0.0625

Consumo Combustible (GLP)

El consumo de GLP por hora se estima con la siguiente fórmula:

Ecuación 5.

$$\text{Consumo GLP} = \text{HP} \times \text{Factor de Consumo de GLP}$$

Donde:

- **HP** es la potencia del motor en caballos de fuerza.
- **Factor de Consumo de GLP** es una constante que estima cuántos litros de GLP consume el motor por cada caballo de fuerza por hora. Este factor varía según el tipo de motor, su eficiencia y las condiciones de uso, pero un valor típico está en el rango de 0.15 a 0.23 litros por HP por hora para motores de eficiencia promedio en condiciones operativas normales. (Heywood, 1988)

Utilizando la ecuación anterior, y realizando el cálculo se obtiene el siguiente cuadro:

Cuadro 13.

Consumo Combustible (GLP)

Equipo	Modelo	Factor de Consumo	Consumo GLP [litros por hora]
Montacarga	GC030-040SVX	0,23	10,12

Factor de Consumo

La utilización de un factor de consumo de 0.23 litros por caballo de fuerza por hora (L/HP-h) para estimar el consumo de combustible de un montacargas, especialmente cuando este opera con Gas Licuado de Petróleo (GLP), se basa en una serie de consideraciones prácticas y técnicas. Este valor refleja un compromiso entre la necesidad de precisión en la planificación del consumo de combustible y el reconocimiento de la variabilidad inherente en las condiciones de operación de los montacargas. A continuación, se detallan las razones fundamentales que justifican la utilización de este factor de consumo específico:

Eficiencia del Motor y Condiciones de Operación: El factor de consumo toma en cuenta la eficiencia típica de los motores de montacargas operando bajo condiciones normales de carga y operación. Los montacargas, dependiendo de su diseño y estado de mantenimiento, pueden variar significativamente en términos de eficiencia. El valor de 0.23 L/HP-h está diseñado para reflejar un promedio ponderado que considera tanto operaciones eficientes como períodos de mayor demanda de energía, como el levantamiento de cargas pesadas o el funcionamiento prolongado a máxima capacidad.

Diversidad de Tareas y Ciclos de Trabajo: Los montacargas son utilizados para una amplia gama de tareas, desde el transporte de cargas ligeras hasta la manipulación de materiales pesados. El factor de 0.23 L/HP-h abarca esta diversidad, proporcionando una estimación que considera tanto los ciclos de trabajo ligeros como los más exigentes. Esta cifra promedia el consumo de combustible a través de diferentes ciclos de trabajo, ofreciendo una base realista para la estimación del consumo de combustible en escenarios de uso mixto.

Variabilidad en la Calidad del Combustible y el Mantenimiento: Este factor también contempla las variaciones en la calidad del GLP y el estado de mantenimiento del montacargas. Un mantenimiento deficiente puede reducir la eficiencia del motor, aumentando el consumo de combustible, mientras que la variabilidad en la composición del GLP puede afectar su poder calorífico y, por tanto, la eficiencia de la combustión. El valor seleccionado ofrece un margen que puede acomodar estas variaciones sin subestimar significativamente el consumo real.

La elección de un factor de consumo de 0.23 L/HP-h para montacargas operando con GLP es el resultado de equilibrar múltiples factores, incluyendo la eficiencia operativa del motor, la diversidad de tareas realizadas, y las variaciones en el mantenimiento y la calidad del combustible. Proporciona una estimación realista para el cálculo del consumo de combustible, útil para la planificación operativa, financiera y ambiental.

Transporte

Las toneladas kilometro se estima con la siguiente fórmula:

Ecuación 6.

$$\text{Toneladas kilómetro (TKM)} = \text{Peso total} \times \text{Distancia de Transporte}$$

Donde:

- **Peso Total** por viaje de madera en toneladas considerando el 15% de madera adicional producto del desperdicio en la etapa de industrialización.
- **Distancia de Transporte** entre el sitio de extracción y la industria, en kilómetros.

Utilizando la ecuación anterior, y realizando el cálculo se obtiene el siguiente cuadro:

Cuadro 14.
Toneladas kilometro

Equipo	Modelo	Peso Total [ton]	Distancia de transporte [km]	TKM [Ton-km / Viaje]
Camión + Carreta	Freightliner Cascadia	11,06	93	1028,39

Para el cálculo anterior se considera la madera de pochote, debido a su mayor peso, se puede obtener una estimación conservadora del consumo de combustible. Esto es porque el transporte de cargas más pesadas generalmente requiere más energía, lo que resulta en un mayor consumo de combustible. Utilizar la madera de pochote como referencia asegura que no se subestimen las necesidades energéticas asociados con el transporte.

Base de Datos

El desarrollo sostenible y la gestión responsable de los recursos naturales son imperativos en la lucha contra el cambio climático y la preservación de nuestro entorno. En este contexto, la evaluación precisa de la huella de carbono de productos y procesos se convierte en una herramienta esencial para identificar y mitigar el impacto ambiental.

La creación de una base de datos detallada sobre cada fase del ciclo de vida de estas especies forestales constituye uno de los objetivos fundamentales de esta investigación. Este apartado se dedica a describir la estructura y propósito de dicha base de datos, diseñada específicamente para alimentar posteriormente el análisis en el Software SimaPro, software líder en la realización de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

Para analizar la eficiencia y el consumo energético de distintos equipos en función de su producción, se toma en cuenta tanto el rendimiento en metros cúbicos por día ($m^3/día$) como el consumo energético o de combustibles. Este análisis permite entender cuánta energía y combustible consume cada equipo por cada metro cúbico de material o producto procesado, ofreciendo una métrica clara para comparar la eficiencia entre diferentes equipos o configuraciones operativas.

La fórmula para calcular el consumo energético y de combustible por metro cúbico de producción se define como:

Consumo de energía por metro cúbico (kWh/m^3):

Ecuación 7.

$$\text{Consumo Energía por } m^3 = \frac{\text{Consumo en } kWh/h \times \text{Horas de operación al día}}{\text{Rendimiento } m^3/día}$$

Consumo de Combustible y Aceite por metro cúbico (Gal/m³):**Ecuación 8.**

$$\text{Consumo Combustible por m}^3 = \frac{\text{Consumo en GPH} \times \text{Horas de operación al día}}{\text{Rendimiento m}^3/\text{día}}$$

Consumo de GLP por metro cúbico (l/m³):**Ecuación 9.**

$$\text{Consumo GLP por m}^3 = \frac{\text{Consumo en Litros por hora} \times \text{Horas de operación al día}}{\text{Rendimiento m}^3/\text{día}}$$

TKM por metro cúbico (TKM/m³):**Ecuación 10.**

$$\text{TKM por m}^3 = \frac{\text{TKM/viaje}}{\text{Rendimiento m}^3/\text{viaje}}$$

La estructuración de esta base de datos ha sido cuidadosamente planificada para asegurar su relevancia y aplicabilidad en el marco del ACV con SimaPro, considerando tanto la diversidad de las fuentes de información como las especificidades de las unidades de medida y formatos de datos.

En el siguiente cuadro, se detallan los datos de consumos por metro cubico de madera para los distintos equipos:

Cuadro 15.
Base de Datos

Fase	Equipo	Modelo	Cantidad	Unidad
Tala	Motosierra	Husqvarna 395 XP®	0,30	Gal / m ³ (Mezcla)
Tala	Motosierra	Husqvarna 395 XP®	0,04	Gal / m ³ (Aceite)
Extracción a Patio	Tractor	Cat D6	4,07	Gal / m ³
Carga de Troza	Cargador 1	Cat 966	1,74	Gal / m ³
Transporte	Camión	Freightliner Cascadia	55,80	TKM / m ³
Descarga	Cargador 2	Cat 950 GC	1,02	Gal / m ³
Aserrío	Aserradero Ecomundo	N/A	138,41	kWh / m ³
Saneo	Sierra	M243C	11,66	kWh / m ³
Acomodo en Bodega	Montacarga	GC030-040SVX	2,33	L / m ³

Adicionalmente, en el análisis de la huella de carbono para cada equipo, es esencial cuantificar las emisiones de dióxido de carbono resultantes de la combustión de combustibles utilizados por los motores. Para ello, se incorpora en el software SimaPro las emisiones de dióxido de carbono utilizando los factores de emisión validados por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) (Instituto Meteorológico Nacional, 2023).

Figura 6.*Factores de Emisión IMN***Dióxido de carbono**

Combustible	Factor de emisión (kg CO ₂ /L combustible)	Incertidumbres		
		Límite inferior	Límite superior	Incertidumbre estándar recomendada
Gasolina	2,231	4,59%	5,89%	2,76%
Diesel	2,613	3,12%	3,19%	1,66%
Búnker	3,101	3,57%	3,65%	1,90%
Queroseno	2,541	3,83%	4,1%	2,09%
LPG	1,611	8,41%	9,16%	4,62%
Gasolina de avión	2,227	7,94%	23,5%	8,46%
Jet fuel	2,505	4,68%	5,32%	2,63%
Lubricante	2,549	11,74%	12,74%	6,44%

Fuente: (Instituto Meteorológico Nacional, 2023).

Para obtener el dióxido de carbono producto de la combustión de los combustibles de la base de datos del Cuadro 15, se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 11.

$$Emisión = Consumo \times Factor \text{ de conversión} \times Factor \text{ de Emisión}$$

Donde:

- **Consumo** es el valor del Cuadro 15 en Gal / m³
- **Factor de conversión** 3, 78541 litros por galón
- **Factor de Emisión** valor de la **Figura 6.** correspondiente al tipo de combustible utilizado por el equipo.

Aplicando las ecuaciones anteriores y los factores, se elaboró el Cuadro 16., que presenta las emisiones de CO₂ por metro cúbico para cada equipo a combustión, lo anterior es necesario realizarlo debido a que el software en su base de datos no cuenta con el equipo específico, así como sus distintos factores de consumo desarrollados en este capítulo, con esto se obtiene una visión más específica del impacto ambiental asociado a estos equipos.

Cuadro 16.
Emisión de dióxido de carbono.

Fase	Equipo	Modelo	Cantidad	Unidad
Tala	Motosierra	Husqvarna 395 XP®	2,5335	kgCO ₂ /m ³
Tala	Motosierra	Husqvarna 395 XP®	0,3859	kgCO ₂ /m ³
Extracción a Patio	Tractor	Cat D6	40,2574	kgCO ₂ /m ³
Carga de Troza	Cargador	Cat 966	17,2108	kgCO ₂ /m ³
Descarga	Cargador	Cat 950 GC	10,0891	kgCO ₂ /m ³
Acomodo en Bodega	Montacarga	GC030-040SVX	3,7536	kgCO ₂ /m ³

La base de datos presentada en el cuadro 15 es un compendio estructurado que resume los consumos unitarios de recursos por metro cúbico de madera, en cada fase del ciclo de vida de la tala a la puerta para las especies forestales estudiadas en el proceso de producción de la empresa Ecomundo S.R.L. A continuación, se proporciona una descripción detallada de cada fase y el equipo utilizado, así como la cantidad y la unidad correspondiente:

Fase de Tala: En esta fase inicial, se utilizan motosierras, específicamente el modelo Husqvarna 395 XP. Se registra un consumo de 0,30 galones de mezcla y 0,04 galones de aceite por metro cúbico de producto final. Esta fase incluye la corta de los árboles seleccionados según el informe de manejo forestal.

Extracción a Patio: Se emplea un tractor, modelo Cat D6, para trasladar los troncos cortados desde el lugar de la tala hasta el patio donde se acumulan y organizan para la siguiente etapa. El consumo asociado es de 4,07 galones por metro cúbico de producto final.

Carga de Troza: Un cargador, modelo Cat 966, se utiliza para cargar los troncos en vehículos de transporte. La cantidad de combustible usado es de 1,74 galones por metro cúbico de producto final.

Transporte: El transporte se realiza mediante un camión, modelo Freightliner Cascadia, encargado de llevar la madera desde el patio de almacenamiento hasta el aserradero. El consumo se mide en

toneladas-kilómetro (TKM) / m³, con un valor de 55,80 TKM/ m³, reflejando la distancia y el peso transportado.

Descarga: Una vez en el aserradero, se utiliza de un cargador, modelo Cat 950 GC, para la descarga de los troncos. El consumo en esta fase es de 1,02 galones por metro cúbico de producto final.

Aserrío: En el aserradero de Ecomundo SRL, que procesa la madera, transformándola en tablas o piezas según requerimiento. Esta etapa consume 138,41 kilowatts-hora (kWh) por metro cúbico de producto final.

Saneo: Se hace uso de una sierra, modelo M243C, para terminar la transformación de las piezas de madera a su medida final. El saneo implica un consumo energético de 11,66 kWh por metro cúbico de producto final.

Acomodo en Bodega: Por último, la etapa de almacenaje y secado de la madera procesada implica el uso de un montacarga, modelo GC030-040SVX, con un consumo de 2,33 litros de gas por metro cúbico de madera.

Durante el acomodo en bodega, las piezas de madera se colocan separadas unas de otras, permitiendo una adecuada circulación de aire entre ellas, lo que facilita un secado al aire progresivo y uniforme. Este método de secado se realiza bajo techo, protegiendo la madera de la intemperie y asegurando que la humedad se reduzca lentamente hasta alcanzar el equilibrio con las condiciones ambientales locales. Este procedimiento no solo respeta el ritmo natural de secado de la madera, sino que también preserva su calidad y minimiza las tensiones internas que podrían causar deformaciones.

Es importante señalar que, en esta fase la madera no se somete a procesos de curado artificial ni a tratamientos preservativos. La razón es debido a que la mayoría de la madera destinada a la venta será procesada de manera secundaria por los proveedores antes de llegar al cliente final. Estos procesos adicionales pueden incluir tratamientos específicos de preservación, curado o incluso acabados que se ajustan a los requerimientos particulares de los proyectos de los clientes.

Cada una de estas fases es esencial para entender la huella de carbono de la extracción e industrialización de madera, debido a que cada paso consume recursos energéticos. Estos datos son fundamentales para realizar un análisis de ciclo de vida completo y fiable que permita identificar oportunidades de reducción de emisiones y eficiencia energética en la industria.

Al concluir la elaboración de la base de datos para la estimación de la huella de carbono de las especies forestales Guanacaste, Cedro y Pochote en Costa Rica, es crucial analizar las implicaciones, limitaciones y potenciales áreas de mejora relacionadas con este trabajo. La integración de datos detallados en el software SimaPro representa un avance significativo en la capacidad para realizar Análisis de Ciclo de Vida (ACV) precisos y fundamentados. Sin embargo, como con cualquier estudio de esta naturaleza, existen desafíos y consideraciones importantes que deben ser abordados.

Limitaciones de los datos

A pesar de los esfuerzos por asegurar la precisión y la relevancia de los datos recopilados, es importante reconocer las limitaciones inherentes a este tipo de investigación. La variabilidad en las prácticas de manejo forestal, las diferencias en la eficiencia de los procesos de transporte y procesamiento, así como la evolución de las tecnologías, pueden influir en la representatividad de los datos. Además, la disponibilidad y calidad de la información primaria puede variar, lo que potencialmente afecta la exactitud de los resultados del ACV.

La creación de esta base de datos y su aplicación en el análisis de ciclo de vida con SimaPro es un paso importante hacia una comprensión más profunda del impacto ambiental de la industria maderera en Costa Rica. Este esfuerzo no solo contribuye al conocimiento científico en el campo del ACV, sino que también proporciona herramientas prácticas para los tomadores de decisiones y los gestores de recursos, apoyando la transición hacia prácticas más sostenibles. Es imperativo que este trabajo se vea como un punto de partida para investigaciones futuras, y que se fomente una cultura de mejora continua y

adaptación a nuevos conocimientos y tecnologías, con el fin último de preservar nuestro medio ambiente para las generaciones futuras.

Carbono almacenado

El cálculo del carbono almacenado en la plantación forestal, guiado por la Regla de Categoría de Producto (PCR) "North American Structural and Architectural Wood Products" (FPInnovations, 2013), (La cual se desarrolla en el siguiente capítulo), adopta un enfoque específico centrado en el equilibrio de carbono del bosque. Este enfoque es crucial para evaluar la huella de carbono de los productos de madera estructural y arquitectónica de América del Norte, reflejando con precisión el impacto ambiental asociado a su producción. La PCR establece un marco metodológico que subraya la importancia de equilibrar el carbono capturado por los árboles durante su crecimiento con el carbono emitido a lo largo de las etapas de cosecha, procesamiento y manufactura de la madera.

De acuerdo con las especificaciones de esta PCR, se destaca que el análisis del carbono almacenado dentro de los límites de la finca forestal debe ser omitido del análisis de ciclo de vida que abarca desde la extracción de materias primas (la cuna) hasta la entrega del producto al consumidor final (la puerta). Esta exclusión permite focalizar el análisis en las emisiones directas derivadas de la producción de los productos de madera, sin considerar los beneficios de secuestro de carbono que ocurren en la plantación.

A pesar de esta exclusión, se realizó el cálculo detallado del carbono almacenado como parte de un ejercicio académico, con el objetivo de obtener una perspectiva más amplia sobre el impacto ambiental de la producción de madera estructural y arquitectónica. Este análisis complementario se alinea con los principios establecidos por la PCR "North American Structural and Architectural Wood Products", permitiendo una evaluación rigurosa del equilibrio de carbono en todo el proceso productivo.

Para determinar la fijación de carbono en el producto final, se estimó el contenido de carbono acumulado en la biomasa de cada especie de madera, tomando en cuenta datos específicos como la densidad de la madera y la capacidad de secuestro de carbono. Este análisis detallado es fundamental para cuantificar el CO₂ fijado por la biomasa forestal, reflejando el papel de los bosques gestionados sosteniblemente en la mitigación del cambio climático.

A continuación, se muestra el análisis para cada especie de madera:

Guanacaste (Enterolobium cyclocarpum)

La madera de guanacaste (*Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb.), un árbol destacado por su adaptabilidad y presencia en Costa Rica, es un miembro importante de la familia Fabaceae-Mimosaceae. Originario de la región que va desde México hasta Venezuela, se ha adaptado bien a la vertiente pacífica de Costa Rica, creciendo en condiciones que varían desde los 750 hasta los 2500 mm de precipitación anual, con temperaturas que fluctúan entre los 23 y los 30 °C, y a altitudes de hasta 1200 msnm. (Rojas-Rodríguez & Torres-Córdoba, 2020)

Este árbol caducifolio alcanza alturas de hasta 50 m y diámetros de tronco de hasta 3 m. Se caracteriza por su copa extendida y ramas ascendentes que forman una silueta semiesférica. La corteza, de color gris claro a blancuzco, es lisa o ligeramente fisurada y se destaca por sus lenticelas visibles y un exudado pegajoso de sabor dulce. Sus hojas se componen de varios pares de pinnas, cada una con numerosos folíolos de color verde pálido a verde oscuro, con una glándula cerca de la base. (Rojas-Rodríguez & Torres-Córdoba, 2020)

El nombre "guanacaste" tiene su origen en el náhuatl "cuáhuatl" (árbol) y "nacaztli" (oreja), en referencia a la forma peculiar de su fruto. Estos son vainas enroscadas, leñosas, lustrosas y de color café oscuro al madurar, conteniendo entre 10 y 15 semillas que semejan a una oreja humana. Las semillas, de color café brillante y forma comprimida, poseen una testa dura y un pleurograma prominente. (Rojas-Rodríguez & Torres-Córdoba, 2020)

La madera de *Enterolobium cyclocarpum* se caracteriza no solo por sus atributos físicos y mecánicos, sino también por su composición química y el contenido de extractivos, que juegan un papel crucial en la determinación de su durabilidad, resistencia a la descomposición y trabajabilidad (Tenorio et al., 2016). Este estudio resalta la importancia de estos factores, ya que tienen un impacto directo en la durabilidad de la madera y su facilidad de trabajo. En particular, *Enterolobium cyclocarpum* demuestra una capacidad moderada de absorber preservativos, lo que sugiere que su albura puede ser tratada efectivamente para incrementar su durabilidad, aunque su duramen presenta algunas limitaciones en este aspecto (Tenorio et al., 2016).

La durabilidad natural de la madera de *Enterolobium cyclocarpum*, especialmente su albura, necesita atención debido a su vulnerabilidad a ataques fúngicos. La resistencia al ataque de hongos y la pérdida de masa varían, señalando la necesidad de tratamiento preservativo para aplicaciones donde la exposición a los elementos y la descomposición son consideraciones importantes (Tenorio et al., 2016). Además, la trabajabilidad de *Enterolobium cyclocarpum* se ha demostrado por su buen desempeño en pruebas de trabajabilidad, como cepillado, lijado, perforado y torneado, lo que resalta su potencial para una variedad de aplicaciones de productos de madera, desde la construcción hasta la fabricación de muebles (Tenorio et al., 2016).

En el siguiente cuadro se muestran las variables necesarias para el cálculo del carbono almacenado:

Cuadro 17.
Parámetros Madera Guanacaste (Enterolobium cyclocarpum)

Dato	Valor	Referencia
Densidad	440 kg/m ³	(Meier, 2024)
Contenido de Carbono	0,50 C / ton	(Birdsey, 1992)
Relación CO ₂ /C	3,67 CO ₂ / C	(Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006)

La fórmula general para calcular la cantidad de CO₂ embebido en la madera a partir de su densidad se puede expresar como la siguiente:

Ecuación 12.

$$CO_2Embebido = Volumen \times Densidad \times Contenido de Carbono \times Relación CO_2/C$$

Donde:

- **CO₂ Embebido:** La cantidad total de dióxido de carbono embebida en la madera.
- **Volumen:** Representa el volumen de la madera considerado para el cálculo (m³).
- **Densidad:** Es la densidad de la madera, definida como la masa por unidad de volumen. Esta variable indica cuántos kilogramos pesa un metro cúbico de madera y varía según la especie y las condiciones del material.
- **Contenido de Carbono:** Este valor representa la proporción aproximada de carbono en la madera en peso seco. Es una constante basada en la composición química promedio de la madera.
- **Relación CO₂ / C:** Es el factor de conversión de carbono a CO₂. Se deriva de la relación entre las masas moleculares del carbono (C, aproximadamente 12 g/mol) y el dióxido de carbono (CO₂, aproximadamente 44 g/mol). Por cada kilogramo de carbono, se pueden producir 3.67 kilogramos de CO₂.

De lo anterior se obtiene:

$$CO_2Embebido = 1 m^3 * 0,44 ton/m^3 * 0,50 C/ton * 3,67 CO_2/C$$

$$CO_2Embebido = 0,807 ton CO_2/m^3$$

Cedro (Cedrela odorata L.)

El *Cedrela odorata* L., comúnmente conocido como Cedro amargo, es una especie nativa de gran importancia económica en la región tropical, valorada especialmente por la calidad de su madera. Su distribución abarca desde México hasta el norte de Argentina y las Antillas, y es ampliamente plantada tanto en América como en África debido a sus cualidades maderables. En Costa Rica, el Cedro amargo prospera en ambas vertientes, desde el nivel del mar hasta los 1200 metros sobre el nivel del mar, lo que subraya su versatilidad y adaptabilidad a diferentes condiciones ambientales. (Rojas-Rodríguez & Torres-Córdoba, 2014).

La madera de cedro es notable por su gran tamaño, copa irregular, amplia y rala, y su fuste recto, bien formado y cilíndrico. La corteza, fisurada y de color gris claro, oculta una madera interna rosada y amarga con un fuerte olor a ajo, características que la hacen muy aromática y semejante a la caoba. Esta especie produce flores blanco-amarillentas y frutos secos tipo cápsula dehiscente, que contienen semillas aladas de sabor y olor a ajo (Rojas-Rodríguez & Torres-Córdoba, 2014).

En cuanto a su reproducción y manejo, la recolección de frutos se lleva a cabo entre marzo y abril, y las semillas se siembran en un sustrato de tierra y arena, cubriéndose apenas superficialmente. La germinación ocurre entre 22 a 38 días después de la siembra, con un porcentaje de éxito que varía entre el 85% y el 100%. Tras la germinación, las plántulas están listas para el repique o trasplante, recomendándose la aplicación de sombra y fertilización química u orgánica una vez que superan los 12 a 15 cm de altura (Rojas-Rodríguez & Torres-Córdoba, 2014).

En el siguiente cuadro se muestran las variables necesarias para el cálculo del carbono almacenado:

Cuadro 18.*Parámetros Madera Cedro (Cedrela odorata)*

Dato	Valor	Referencia
Densidad	470 kg/m ³	(Meier, 2024)
Contenido de Carbono	0,50 C / ton	(Birdsey, 1992)
Relación CO ₂ /C	3,67 CO ₂ / C	(Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006)

Con el procedimiento antes indicado, se procede a estimar el carbono embebido:

$$CO_2Embebido = 1 \text{ m}^3 * 0,47 \text{ ton/m}^3 * 0,50 \text{ C/ton} * 3,67 \text{ CO}_2/\text{C}$$

$$CO_2Embebido = 0,862 \text{ ton CO}_2/\text{m}^3$$

Pochote (Bombacopsis quinata)

El pochote (*Bombacopsis quinata*), una especie de rápido crecimiento y de interés comercial en Costa Rica, es reconocida por sus propiedades maderables y su utilización en diversas aplicaciones forestales e industriales. Su manejo en plantaciones forestales ha sido optimizado para maximizar su valor comercial, con densidades que varían entre 338 y 575 árboles por hectárea y edades de cosecha entre 9 y 13 años, dependiendo de la intensidad del manejo y las condiciones de crecimiento específicas de cada plantación (Moya-Roque, Roger et al., 2010).

Desde el punto de vista del aprovechamiento, el pochote presenta ciertas características únicas debido a sus numerosos agujeros en el fuste, lo que puede complicar la manipulación de las trozas. Sin embargo, su fuste recto y sin bifurcaciones permite un procesamiento eficiente en la industria maderera. Las operaciones de corte, desrame, y transporte de trozas se realizan teniendo en cuenta estas características, optimizando los tiempos y métodos de trabajo para minimizar los daños y maximizar la eficiencia del aprovechamiento (Moya-Roque, Roger et al., 2010).

En términos de sus propiedades físicas y mecánicas, el pochote se clasifica como una madera de moderado peso específico y moderada resistencia mecánica. Esta clasificación se basa en el peso

específico básico y las propiedades de contracción y expansión de la madera, lo que influye directamente en su estabilidad dimensional y resistencia estructural. La madera de pochote ha demostrado tener un buen comportamiento en el secado, con tiempos y condiciones que aseguran una mínima aparición de defectos durante este proceso. Además, su capacidad para ser preservada mediante técnicas de presión y difusión hace que sea una opción viable para aplicaciones que requieren mayor durabilidad y resistencia a factores ambientales y biológicos (Moya Roque et al., 2011).

La trabajabilidad de la madera de pochote, incluyendo operaciones como el aserrío, cepillado, taladrado y acabado, se ha evaluado positivamente, indicando que esta especie puede ser utilizada eficazmente en una amplia gama de productos y aplicaciones madereras, desde estructuras de construcción hasta muebles y acabados interiores. Esto, sumado a su disponibilidad proveniente de plantaciones forestales sostenibles, hace que el pochote sea una opción atractiva para la industria maderera en Costa Rica y potencialmente en otros mercados internacionales (Moya-Roque, Roger et al., 2010).

En el siguiente cuadro se muestran las variables para el cálculo del carbono almacenado:

Cuadro 19.

Parámetros Madera Pochote (Bombacopsis quinata)

Dato	Valor	Referencia
Densidad	350 kg/m ³	(Moya-Roque, R. et al., 2012)
Contenido de Carbono	0,50 C / ton	(Birdsey, 1992)
Relación CO ₂ /C	3,67 CO ₂ / C	(Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006)

Con el procedimiento antes indicado, se procede a estimar el carbono embebido:

$$CO_2Embebido = 1 m^3 * 0,35 \text{ ton}/m^3 * 0,50 \text{ C}/\text{ton} * 3,67 \text{ CO}_2/\text{C}$$

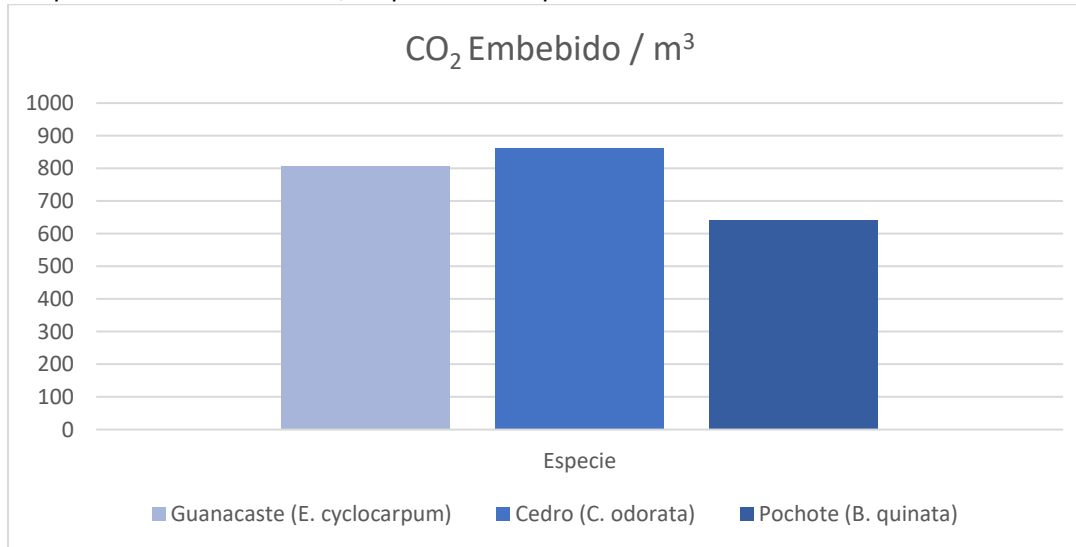
$$CO_2Embebido = 0,642 \text{ ton CO}_2/m^3$$

Análisis

La comparativa entre los valores de carbono almacenado en estas tres especies revela diferencias significativas que merecen ser destacadas. El Guanacaste, con un valor de 0.807 toneladas de CO₂ almacenado por metro cúbico de madera, se presenta como una opción robusta para el almacenamiento de carbono, beneficiándose de su impresionante porte y su rápida tasa de crecimiento. En contraste, el Cedro, con un almacenamiento de 0.862 toneladas de CO₂ por metro cúbico, ofrece no solo un valor ligeramente superior en términos de captura de carbono sino también características de durabilidad y resistencia que lo hacen idóneo para una variedad de aplicaciones, desde muebles de lujo hasta construcciones navales. El Pochote, por su parte, almacena 0.642 toneladas de CO₂ por metro cúbico, mostrando que, a pesar de tener la menor densidad entre las especies analizadas, sigue siendo una opción valiosa.

Figura 7.

Gráfico comparativo CO₂ embebido /m³ para cada especie de madera analizada.



Este análisis subraya la relevancia de adoptar prácticas de manejo forestal sostenible y la necesidad de una elección consciente de materiales de construcción. La elección de especies forestales no solo debe guiarse por consideraciones estéticas o de durabilidad sino también por su capacidad de contribuir al secuestro de carbono, reflejando un compromiso más amplio con la sostenibilidad ambiental.

La exclusión del carbono almacenado del análisis de ciclo de vida (de la cuna a la puerta) propuesto por la PCR no debe considerarse una omisión de su valor, sino más bien, un enfoque que resalta la importancia de centrarse en las emisiones directas derivadas de la producción de los productos de madera, sin perder de vista los beneficios globales del secuestro de carbono. La inclusión de los cálculos detallados del carbono almacenado como parte de este ejercicio académico busca generar una base para la discusión y una comprensión más profunda del impacto ambiental de la producción de madera estructural y arquitectónica, pero siempre alineándose con los principios establecidos por la PCR "North American Structural and Architectural Wood Products".

Huella de Carbono

Para el desarrollo de este capítulo, se utilizó la metodología establecida por la Regla de categoría de producto (PCR) "North American Structural and Architectural Wood Products" (FPInnovations, 2013), recomendada por el MSc. Luis Valerio Pérez, se inició un proceso detallado para estimar la huella de carbono de las especies forestales, siguiendo la normativa INTE/ISO 14067:2019 como marco referencial y utilizando el software SimaPro 9.4.0.3. Este enfoque metodológico, fue seleccionado por su alineación con los estándares internacionales y su adecuación al contexto específico de este estudio, permitiendo abordar de manera integral cada etapa del ciclo de vida de la madera, desde la extracción hasta su transformación final. A continuación, el desarrollo de lo indicado por la regla de categoría:

Empresa/organización, producto y categoría de producto.

Descripción de la compañía

Ecomundo S.R.L. es una compañía que se dedica a la importación, procesamiento y distribución de madera, para esto procesa maderas adquiridas a nivel nacional, así como importa de distintas partes de América. Actualmente la empresa no cuenta con certificación ISO 14001, pero se encuentra dentro de las metas a mediano plazo.

Respecto a la madera nacional, la misma es obtenida de fincas que cuentan con permiso de aprovechamiento por parte de los distintos entes nacionales, así como manejo forestal producto de la regencia forestal. Para esta investigación la finca analizada está ubicada en el distrito de Acapulco, cantón de Puntarenas, Costa Rica.

Las bodegas y aserradero se encuentran ubicados en el distrito de Rincón de Arias, cantón de Grecia, Alajuela, Costa Rica; lugar donde se lleva a cabo la industrialización de la materia prima, así como el almacenamiento del producto para la venta.

Definición de la Categoría de Producto

Según la regla de categoría anteriormente citada, se define según la tabla 1, el producto de esta investigación como: Madera Aserrada (Lumber / timber) según la norma ASTM D9-09ae1.

Descripción del Producto

El producto es madera aserrada utilizada para construcción, ya sea de manera temporal o permanente, en distintas dimensiones comerciales tales como 1x4", 2x4", 2x6", 2x8" en largos de 3 y 4 varas.

Producto

Figura 8.

Madera Guanacaste (Enterolobium cyclocarpum)



Fuente: (Meier, 2024)

Figura 9.

Madera Cedro (Cedrela odorata)



Fuente: (Meier, 2024)

Figura 10.

Madera Pochote (Bombacopsis quinata)



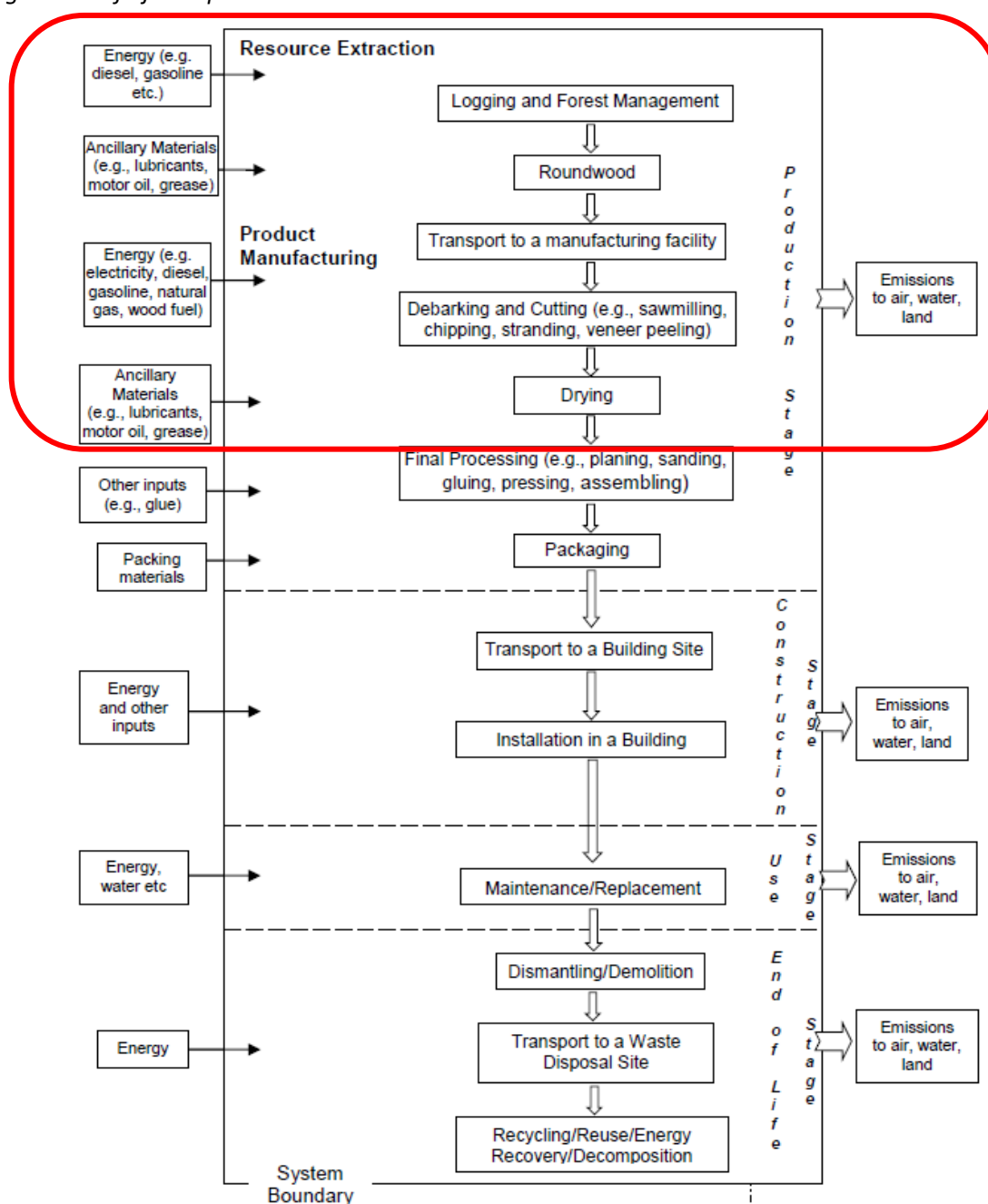
Fuente: (Superior Lumber, 2024)

Diagrama de flujo de los procesos de producción

A continuación, se muestra un diagrama del producto, lo que se encierra en rojo son las etapas que se abarcaron en esta investigación.

Figura 11.

Diagrama de flujo del proceso



Fuente: (FPInnovations, 2013)

En los siguientes diagramas se desglosan los procesos analizados en esta investigación:

Figura 12.

Extracción de Materia Prima

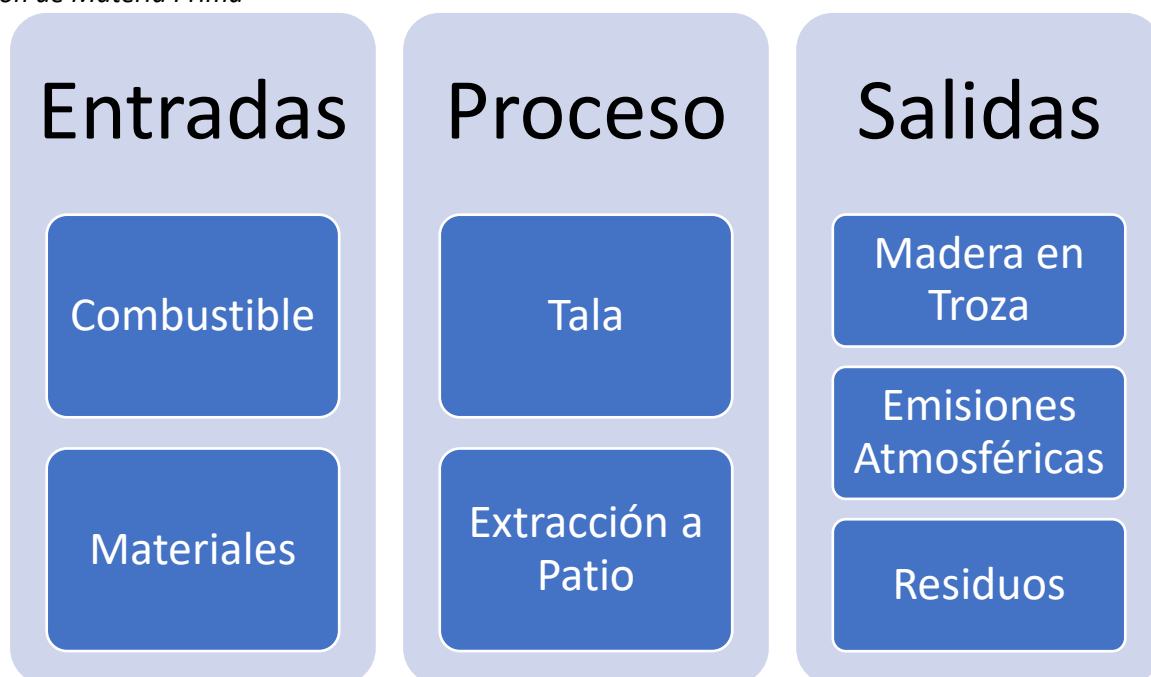


Figura 13.

Transporte de la madera a la industria

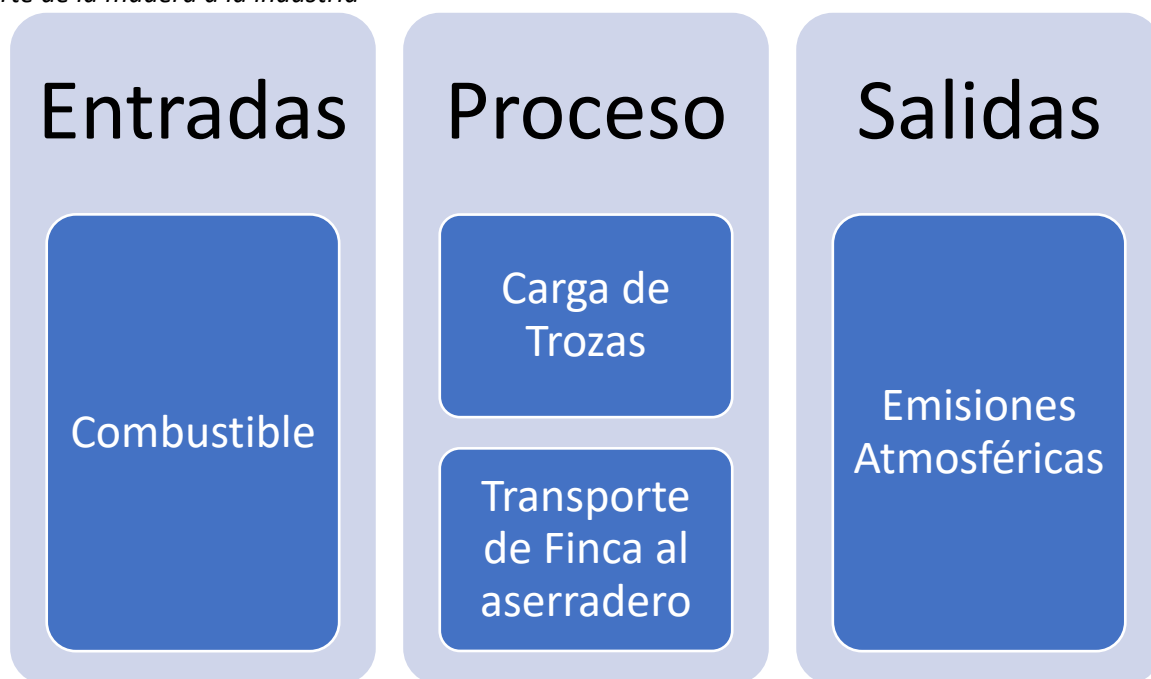
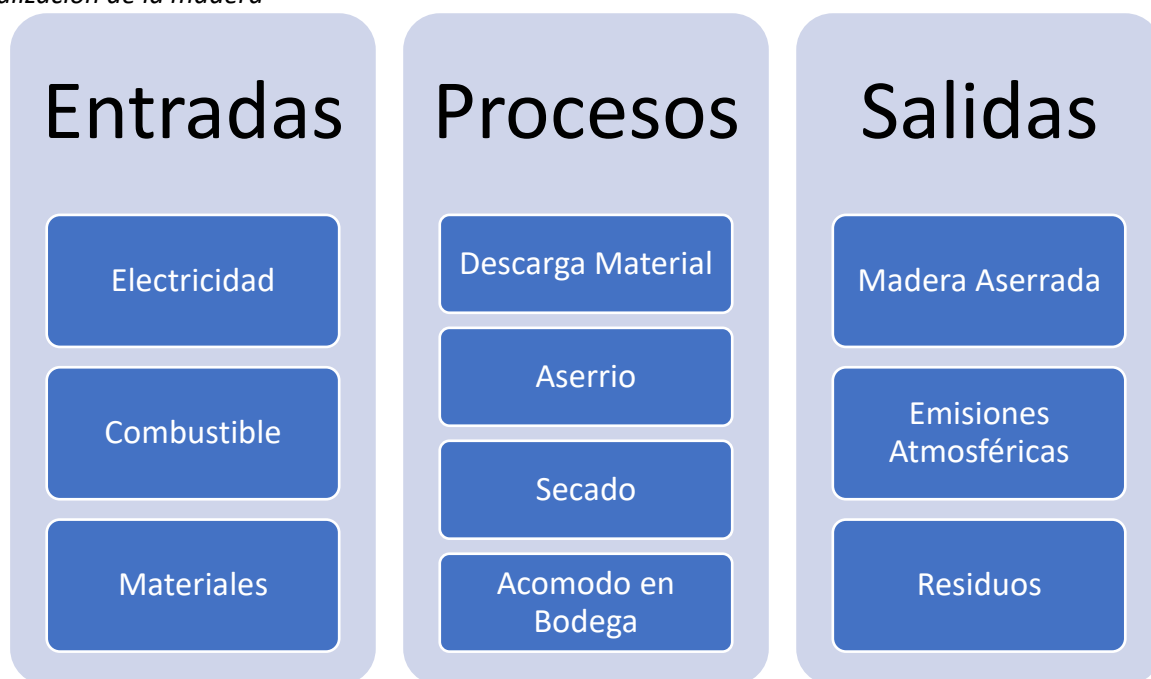


Figura 14.*Industrialización de la madera*

Los procesos productivos excluidos del estudio fueron:

- Actividades de cambio de uso de suelo
- Generación de residuos en finca y su respectiva emisión de carbono
- Uso de lubricantes para el mantenimiento de maquinaria en industria

Requisitos para la evaluación del ciclo de vida subyacente

Unidad funcional y declarada

La unidad funcional para este estudio se define como 1 (un) metro cubico de madera aserrada procesada en el aserradero de la empresa Ecomundo SRL ubicado en Grecia de Alajuela, lo anterior dado que la salida del producto en secciones típicas (2"x4", 2x6" u 2x8") es variada en función de la demanda del mercado.

Límites del sistema

Los procesos considerados en este estudio son:

- Construcción de Carril de Arrastre
- Tala de arboles
- Extracción a Patio
- Carga de Trozas
- Traslado de Finca al aserradero
- Descarga del material
- Aserrío
- Secado
- Cepillado
- Acomodo en Bodega

Los procesos excluidos de esta investigación son:

- Generación de residuos en finca y su respectiva emisión de carbono.

Descripción de los datos

Los datos de los procesos de extracción de materia prima se tomaron de la finca ubicada en el distrito de Acapulco, cantón de Puntarenas, Costa Rica para el año 2023.

Cuadro 20.

Datos generales de la finca

Finca	Área Total (ha)	Distancia a industria (km)
Sardinal	583.3082	93.0

Los datos de la industrialización corresponden a los del aserradero de Ecomundo SRL, ubicado en Rincón de Arias, Grecia, Alajuela, Costa Rica para el año 2023.

Las fuentes de datos para cada etapa se describen en los siguientes cuadros:

Cuadro 21.

Fuentes de Datos

Etapa	Fuentes de los Datos
Extracción	Se obtuvieron los datos mediante entrevista a Encargado de Extracción el Sr. Cristian Chavarría, así como del informe de manejo forestal con el que cuenta la finca.
Transporte	Los datos de capacidad por tipo de camión se obtuvieron por medio de entrevista con el Sr. Cristian Chavarría. Se utilizó Google Maps para calcular la distancia de la finca a la industria.
Industrialización	Entrevista a Encargado de Industrialización: ing. Luis Brenes, así como levantamiento de equipos en el aserradero de Ecomundo

Reglas de Corte

Se ha considerado más del 95% del potencial de impacto ambiental asociado a la unidad funcional mediante flujos de masa y energía. En relación con la PCR seleccionada, las reglas de corte aplicadas en el estudio son las siguientes:

Masa: Se pueden excluir los flujos de masa que representen menos del 1% del total acumulado por unidad del proceso, siempre y cuando su relevancia ambiental sea insignificante.

Energía: Los flujos de energía que constituyan menos del 1% del total acumulado por unidad del proceso pueden ser excluidos, siempre que su relevancia ambiental sea insignificante.

La relevancia ambiental se determina considerando ambos criterios anteriores. Sin embargo, si un flujo cumple con ambos criterios y, además, se determina que contribuye con el 2% o más a las categorías de impacto seleccionadas, debe incluirse dentro del límite del sistema.

Se debe incluir al menos el 95% del flujo de masa, y los datos de impacto del ciclo de vida deben abarcar al menos el 95% de todos los flujos elementales que contribuyen a cada uno de los indicadores de las categorías declaradas.

Requisitos de calidad de datos

Cualquier fuente de datos secundarios utilizada en el inventario subyacente del ciclo de vida debe ser completa y representativa de la región de América del Norte correspondiente en términos de su cobertura geográfica y tecnológica, y debe tener una actualización reciente, generalmente de menos de diez años. Cualquier desviación de estos requisitos iniciales de calidad de datos para los datos secundarios debe documentarse (FPInnovations, 2013).

Unidades

Se utilizaron unidades del Sistema Internacional (SI), con sus respectivas conversiones. Las unidades preferidas para la potencia y la energía son las siguientes:

- kWh (MJ) para la energía eléctrica
- kW (MW) para la potencia

Análisis del inventario del ciclo de vida

Recolección de Datos

Temporal

Para el proceso de extracción, transporte e industrialización, se dispone de datos correspondientes al año 2023. Estos datos actualizados son recopilados mediante entrevistas y observaciones en campo, dado que en el proceso de extracción principalmente el encargado no lleva un control exacto y preciso de consumos.

Geográfico

El proceso de extracción de la madera se lleva a cabo en una finca ubicada en el distrito de Acapulco, cantón de Puntarenas, Costa Rica, la madera es trasladada a Grecia, Alajuela para realizar el proceso de industrialización.

Tecnología

En la fase de tala, se emplean equipos GPS que permiten una selección precisa de árboles, reduciendo al mínimo la afectación a árboles y áreas no deseadas. La extracción se realiza con maquinaria especializada que agiliza el transporte de troncos de manera eficiente. En el aserrío, se utilizan aserraderos fijos de acuerdo con el diámetro de la troza para maximizar la producción y minimizar los residuos.

Reglas de asignación

En un proceso de producción donde se generan más de un tipo de producto, es necesario asignar los flujos ambientales (entradas y salidas) del proceso a los diferentes productos para obtener datos de inventario basados en productos. En principio, las reglas de asignación deben reflejar el objetivo del proceso de producción (FPIinnovations, 2013).

En el análisis de ciclo de vida (ACV) llevado a cabo, no se aplicaron reglas de asignación al proceso de extracción, ya que todo el ciclo de trabajo se centra en el material investigado. En cambio, en lo que respecta a la industrialización, los procesos fueron calculados considerando los rendimientos y la potencia de los equipos/motores.

Categorías de impacto y factores de caracterización

Indicadores de categorías de impacto, factores de caracterización y parámetros que deben informarse

Según la PCR, a continuación, se muestra la tabla de categoría de impactos ambientales, uso de recursos y generación de residuos a considerar para un análisis completo de ciclo de vida.

Tabla 1.

Adaptación de declaración de impactos ambientales, uso de recursos y generación de residuos del Regla de Categoría de Producto.

Indicador	Unidad
Potencial de Calentamiento Global (GWP)	kg CO2 equivalente

Fuente: (FPInnovations, 2013)

Modelado del proceso en SIMAPRO

Se procede con la introducción de los datos en SimaPro, utilizando la base de datos detallada en el Cuadro 15, la cual recopila los consumos unitarios de recursos por metro cúbico de madera en cada fase del ciclo de vida. Este conjunto de datos es esencial para llevar a cabo un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) que refleje con precisión las operaciones llevadas a cabo en el proceso de producción. La información compilada es un reflejo meticuloso de la realidad operativa y será la base para la evaluación del impacto ambiental asociado a la producción de madera. El uso de estos datos específicos es crucial para asegurar que el modelo de ACV generado sea representativo de las prácticas de producción y permita evaluaciones confiables y relevantes.

Librerías

En el análisis realizado con SimaPro, se han seleccionado y utilizado bibliotecas de datos fundamentales para proporcionar un marco de datos exhaustivo y relevante. Entre las bibliotecas incorporadas se encuentran "Ecoinvent 3" tanto en su versión de sistema como de unidad, conocidas por su amplia recopilación de datos de inventario de ciclo de vida y consideradas como una de las bases de datos más completas a nivel mundial en el ámbito de ACV.

La biblioteca "Industry data 2.0" se ha seleccionado para su uso debido a su relevancia específica para datos industriales, ofreciendo una cobertura detallada de procesos y tecnologías industriales. Además, la inclusión de "USLCI", la base de datos del Inventario del Ciclo de Vida de los Estados Unidos, proporciona información fundamental sobre el ciclo de vida de bienes y servicios en el contexto

estadounidense, lo que enriquece el análisis al considerar prácticas y parámetros operativos de esta región.

Por último, la biblioteca "Methods" se ha elegido para la evaluación de impactos, dado que ofrece métodos de impacto ambiental establecidos que permiten la cuantificación y comparación de los impactos potenciales derivados de los inventarios de ciclo de vida. Esta selección de bibliotecas asegura un análisis robusto y representa una compilación diversa de datos y metodologías que refuerzan la precisión y la relevancia del estudio de ACV.

Figura 15.
Librerías SimaPro.

Select:	Name	Protection /
<input type="checkbox"/>	Agri-footprint - economic - system	
<input type="checkbox"/>	Agri-footprint - economic - unit	
<input checked="" type="checkbox"/>	Ecoinvent 3 - allocation, cut-off by classification - system	
<input checked="" type="checkbox"/>	Ecoinvent 3 - allocation, cut-off by classification - unit	
<input type="checkbox"/>	EU & DK Input Output Database	
<input checked="" type="checkbox"/>	Industry data 2.0	
<input checked="" type="checkbox"/>	Methods	
<input checked="" type="checkbox"/>	USLCI	

Método de Análisis

Al incorporar la metodología del IPCC 2021 GTP100 V1.02 en el software SimaPro para la estimación de la huella de carbono, se utiliza una métrica respaldada por la autoridad del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). Esta métrica, detallada en el "Climate Change 2021: The Physical Science Basis" que forma parte del Sexto Informe de Evaluación del IPCC, permite comparar las emisiones de diferentes gases de efecto invernadero basándose en su potencial de cambio de la temperatura global en un horizonte de 100 años (IPCC, 2021)

El Global Temperature-change Potential (GTP) ofrece una perspectiva centrada en el impacto térmico directo de los gases de efecto invernadero, contrastando con el Potencial de Calentamiento Global (GWP) que mide la energía que los gases atrapan en la atmósfera durante un periodo de tiempo definido. Esta aproximación se considera especialmente relevante para políticas dirigidas a limitar el aumento de la

temperatura global y está alineada con los objetivos establecidos en acuerdos internacionales como el Acuerdo de París (Rogelj et al., 2017)

La versión 1.02 del GTP100 refleja las últimas actualizaciones proporcionadas por el IPCC, asegurando que el análisis de la huella de carbono en SimaPro esté en concordancia con las más recientes y robustas estimaciones científicas disponibles respecto al impacto climático de las emisiones de GEI.

Procesos

La transición de los datos crudos hacia un análisis sofisticado de ciclo de vida comienza con la creación de procesos en SimaPro. Este paso constituye la columna vertebral del modelo de ACV, donde cada actividad, desde la extracción de materia prima hasta el acomodo final del producto, se simula a través de una serie de procesos interconectados. Estos procesos son representaciones digitales de las operaciones reales, configuradas en el software para reflejar con fidelidad las interacciones y el flujo de materiales y energía que ocurren en cada fase de la producción de la madera. En este apartado, se detalla cómo los datos de la base de datos previamente establecida se han traducido en procesos individuales dentro de SimaPro, enfocándose en la importancia de cada proceso para comprender el perfil de sostenibilidad del producto final. La configuración precisa de estos procesos es crucial, ya que constituyen los bloques de construcción para los análisis subsiguientes y la interpretación de los impactos ambientales asociados a la producción de madera.

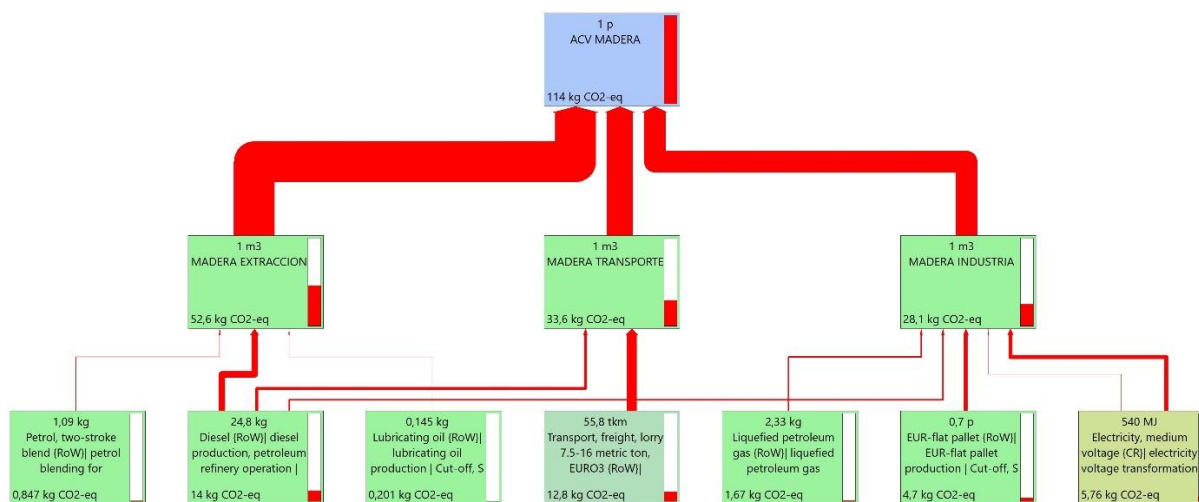
Huella de Carbono

En este apartado se muestran los resultados de la simulación realizada en el Laboratorio de Ciclo de Vida y Economía Circular del Tecnológico de Costa Rica, lo anterior mediante el software SimaPro.

La siguiente figura muestra la huella de carbono por proceso, así como sus principales insumos:

Figura 16.

Diagrama huella de carbono por procesos



De la anterior figura y gracias a la simulación realizada en el software, se extraen los siguientes datos, divididos en fósil, biogénico y de transformación de la tierra, los cuales componen la huella de carbono total reportada.

Cuadro 22.

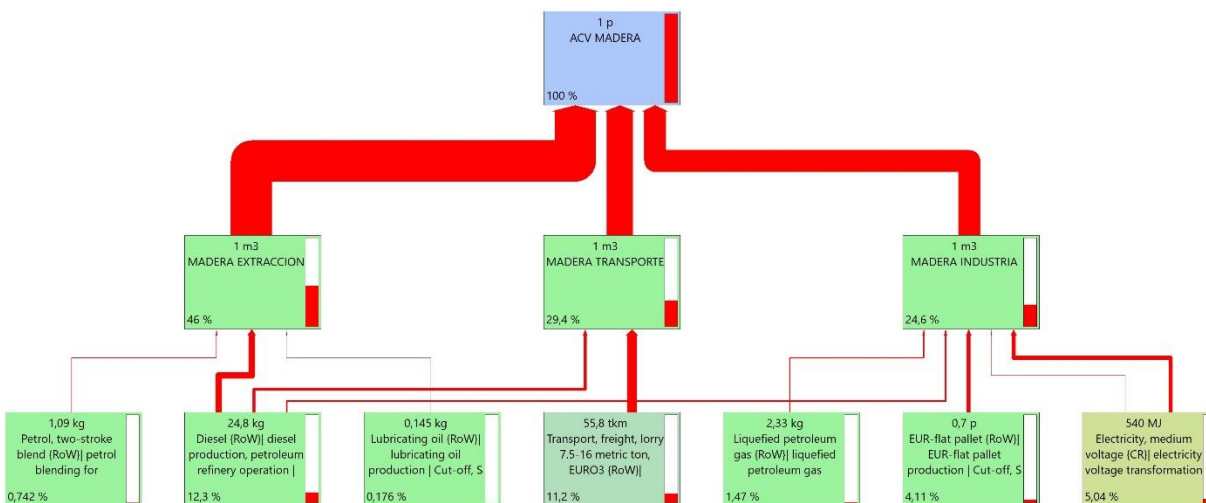
Huella de Carbono por proceso.

Categoría de impacto	Unidad	Total	Extracción	Transporte	Industria
GTP100 - fossil	kg CO ₂ -eq	114.1845509	52.58909353	33.55492968	28.04052772
GTP100 - biogenic	kg CO ₂ -eq	0.010264608	0.000759129	0.00089449	0.008610989
GTP100 - land transformation	kg CO ₂ -eq	0.033650321	0.003918344	0.008218322	0.021513655

En la siguiente figura se muestra los resultados anteriormente mencionados, a nivel porcentual:

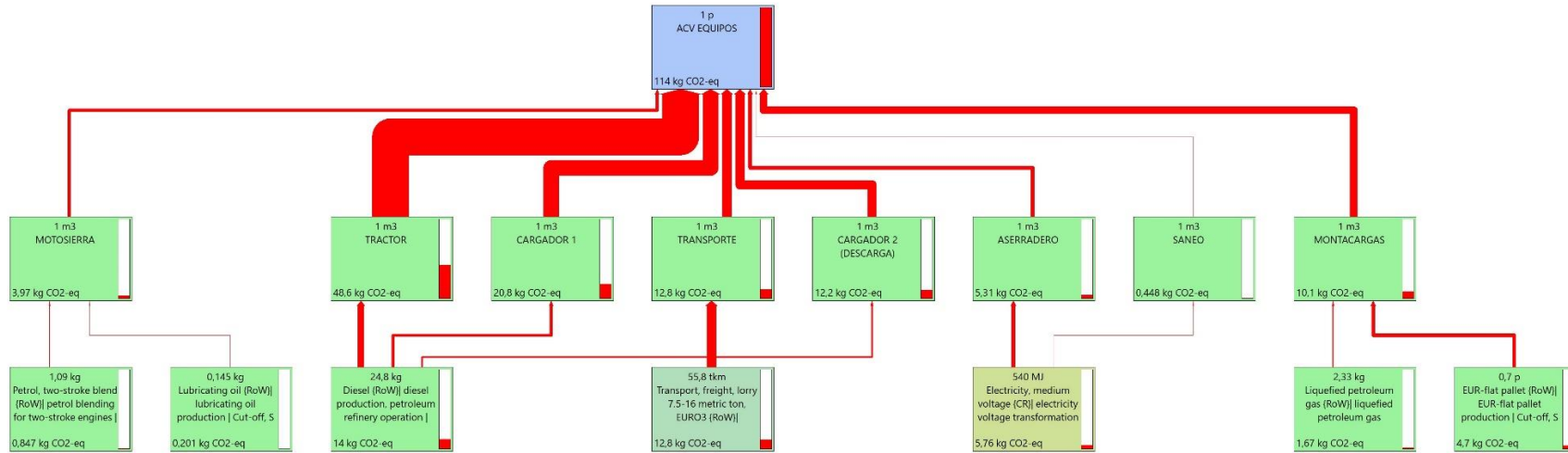
Figura 17.

Diagrama huella de carbono por procesos (Porcentajes)



Con el fin de profundizar más en el tema, y determinar no solo cual proceso es el que aporta más a la huella de carbono, sino también cual equipo o equipos aportan más huella es que se realizó una segunda modelación en la cual se analizaron los equipos por separado, la cual se muestra a continuación:

Figura 18.
Diagrama huella de carbono por equipos.



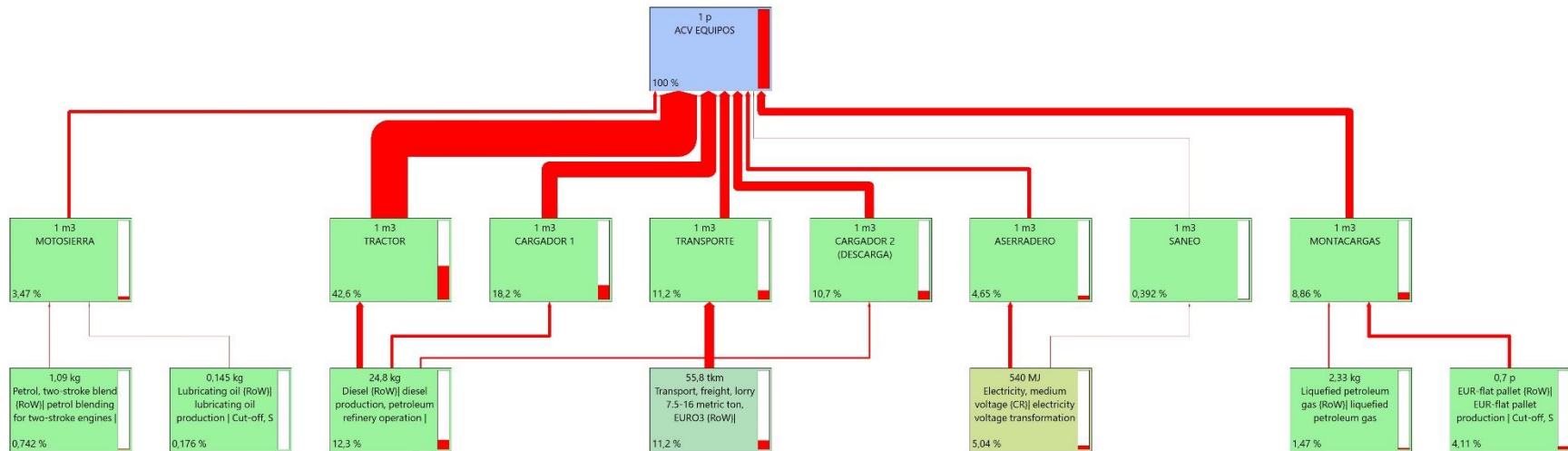
Al igual que en el análisis anterior se extraen los datos segregados del software, obteniéndose el siguiente cuadro:

Cuadro 23.
Huella de Carbono por Equipos.

Categoría de impacto	Unidad	Total	Motosierra	Tractor	Cargador 1	Camión	Cargador 2	Aserradero	Sierra	Montacargas
GTP100 - fossil	kg CO ₂ -eq	114.185	3.9670353	48.6221	20.786846	12.768	12.185403	5.3113544	0.447	10.096329
GTP100 - biogenic	kg CO ₂ -eq	0.01026	0.0001249	0.00063	0.0002712	0.0006	0.0001590	0.0003671	0.000	0.0080540
GTP100 - land transformation	kg CO ₂ -eq	0.03365	0.0005617	0.00336	0.0014350	0.0068	0.0008412	0.0015391	0.000	0.0190037

En la siguiente figura se muestra los resultados a nivel porcentual:

Figura 19.
Diagrama huella de carbono por equipo (Porcentajes)



Con los resultados obtenidos mediante ambas simulaciones se determina que la huella de carbono total resultante de la producción de 1m³ de madera aserrada en Costa Rica, tomando en cuenta todas las fases y equipos involucrados en el proceso, se eleva a 114.185 kg de CO₂ equivalentes en la categoría fósil, 0.01026 kg de CO₂ equivalentes en la categoría biogénica y 0.03365 kg de CO₂ equivalentes en la categoría de transformación de la tierra. Estas cifras encapsulan el impacto acumulado y nos proporcionan una métrica crucial para entender la magnitud de la intervención humana en términos de emisiones de gases de efecto invernadero.

Principales Fuentes de Emisiones.

En el marco del análisis realizado mediante el método IPCC 2021 GTP100 v1.02 en SimaPro, se consideran tres categorías distintas de la huella de carbono para evaluar el impacto ambiental de la extracción e industrialización de madera aserrada: fósil, biogénico y de transformación de la tierra. Cada una mide distintos aspectos de las emisiones de gases de efecto invernadero.

La categoría GTP100 - fósil cuantifica las emisiones de CO₂ derivadas de la quema de combustibles fósiles. Estas emisiones son críticas ya que contribuyen directamente al aumento de los gases de efecto invernadero en la atmósfera, con un potencial de calentamiento global a largo plazo. Esto incluye el uso de maquinaria y transporte durante las etapas de extracción e industrialización de la madera.

Por su parte, la categoría GTP100 - biogénico se enfoca en las emisiones de carbono que son parte del ciclo corto del carbono biológico. Este ciclo se refiere al CO₂ que las plantas absorben durante su crecimiento y que posteriormente se libera a la atmósfera a través de la combustión o descomposición de biomasa. A diferencia de las emisiones fósiles, las emisiones biogénicas se consideran parte de un ciclo natural y, en teoría, pueden ser neutrales en carbono si la biomasa se gestiona de manera sostenible.

Finalmente, la categoría GTP100 - transformación de la tierra mide las emisiones asociadas con cambios en el uso del suelo. Esto puede incluir la deforestación, la degradación del suelo y otros cambios en la cobertura terrestre que afectan la capacidad del suelo de actuar como un sumidero de carbono, así como las emisiones liberadas por la alteración física del suelo y la vegetación. Este aspecto es fundamental porque abarca los efectos a largo plazo de la gestión del terreno sobre el clima.

Cada una de estas categorías ofrece una ventana distinta para entender y gestionar el impacto ambiental de las actividades humanas, subrayando la importancia de estrategias diferenciadas para abordar cada tipo de emisión en la búsqueda de una producción más sostenible.

Entrando en el análisis de la huella de carbono por procesos, la categoría GTP100 - fósil muestra un total de 114.1845509 kg de CO₂-eq por metro cúbico de madera aserrada, lo que se desglosa de la siguiente manera:

- **Extracción:** Con 52.589 kg CO₂-eq, es la más significativa de las tres etapas, probablemente debido al uso intensivo de combustibles fósiles.
- **Transporte:** Se registra una emisión de 33.555 kg CO₂-eq, destacando el consumo de combustible en el traslado de la madera desde su origen hasta el punto de procesamiento.
- **Industria:** La manufactura aporta 28.041 kg CO₂-eq, sugiriendo que la transformación de la madera en productos finales también incurre en una cantidad notable de emisiones.

En cuanto a la categoría GTP100 - biogénico, que contabiliza las emisiones del carbono que es parte del ciclo corto de carbono biológico, el total es de 0.010264608 kg CO₂-eq, repartido de la siguiente forma:

- **Extracción:** Aporte mínimo con 0.00076 kg CO₂-eq.
- **Transporte:** Contribuye con 0.00089 kg CO₂-eq, un poco más que la extracción a pesar de su menor escala.
- **Industria:** Tiene la mayor cantidad en esta categoría con 0.00861 kg CO₂-eq

Para la categoría GTP100 - transformación de la tierra, que incluye las emisiones por cambios en el uso del suelo, el total asciende a 0.0337 kg CO₂-eq. La distribución por etapas es:

- **Extracción:** Produce 0.0039 kg CO₂-eq, lo cual es el menor de los tres procesos para esta categoría.
- **Transporte:** Aumenta a 0.0082 kg CO₂-eq, indicando que el movimiento de la madera puede afectar más la transformación del terreno.
- **Industria:** Con 0.0215 kg CO₂-eq, esta etapa muestra el impacto más grande en la transformación de la tierra.

En general, la producción de 1m^3 de madera aserrada tiene una huella de carbono asociada que varía significativamente entre las etapas de su producción. La fase de extracción se destaca como la que más impacta, lo cual sugiere que es una etapa clave para intervenciones de mitigación. También es importante resaltar que para este análisis la huella de carbono proviene casi en su totalidad por combustibles fósiles, de ahí la gran diferencia en magnitud respecto al biogénico y de transformación de la tierra.

Respecto al análisis de la huella de carbono por equipo, para la producción de 1m^3 de madera aserrada, basado en los datos introducidos al software SimaPro y realizando la simulación utilizando el método IPCC 2021 GTP100 v1.02, nos permite desglosar y entender el impacto de cada equipo en las tres categorías de impacto: fósil, biogénico y transformación de la tierra.

En la categoría GTP100 - fósil, que mide las emisiones de CO_2 procedentes de fuentes fósiles, se observa una huella de carbono total de $114.185\text{ kg CO}_2\text{-eq}$ que es consecuente con la huella de carbono obtenida en el análisis por procesos anteriormente analizado. El tractor sobresale con una contribución considerable de $48.6221\text{ kg CO}_2\text{-eq}$, debido a su papel en operaciones como el arrastre de troncos y la preparación del terreno. El cargador 1 también tiene una huella importante, con $20.786846\text{ kg CO}_2\text{-eq}$, indicando su rol significativo en la manipulación de la madera. El camión, responsable del transporte, genera $12.768\text{ kg CO}_2\text{-eq}$, y el cargador 2, usado en la descarga, contribuye con $12.185403\text{ kg CO}_2\text{-eq}$. El aserradero y la sierra, donde se procesa la madera, tienen emisiones de $5.3113544\text{ kg CO}_2\text{-eq}$ y $0.447\text{ kg CO}_2\text{-eq}$ respectivamente, mientras que el montacargas, que se utiliza en las etapas finales del manejo del producto, añade $10.096329\text{ kg CO}_2\text{-eq}$ al total.

En la categoría GTP100 - biogénico, que incluye las emisiones de CO_2 que forman parte del ciclo corto del carbono biológico, el total es de $0.01026\text{ kg CO}_2\text{-eq}$. La motosierra tiene la menor huella con $0.0001249\text{ kg CO}_2\text{-eq}$, seguida del tractor y el cargador 1 con $0.00063\text{ kg CO}_2\text{-eq}$ y $0.0002712\text{ kg CO}_2\text{-eq}$ respectivamente. El camión aporta $0.0006\text{ kg CO}_2\text{-eq}$, y el cargador 2 tiene $0.0001590\text{ kg CO}_2\text{-eq}$. El aserradero y la sierra producen $0.0003671\text{ kg CO}_2\text{-eq}$ y la huella del montacargas en esta categoría es de $0.0080540\text{ kg CO}_2\text{-eq}$.

Por último, en la categoría GTP100 - transformación de la tierra, que evalúa las emisiones por cambios en el uso del suelo, el montacargas tiene el impacto más alto con 0.0190037 kg CO₂-eq. La motosierra y el tractor siguen con 0.0005617 kg CO₂-eq y 0.00336 kg CO₂-eq respectivamente. El cargador 1 aporta 0.0014350 kg CO₂-eq, y el camión 0.0068 kg CO₂-eq. El cargador 2 y el aserradero tienen emisiones de 0.0008412 kg CO₂-eq y 0.0015391 kg CO₂-eq respectivamente.

En los siguientes cuadros se muestra una síntesis de los indicadores utilizados para medir el potencial de calentamiento global (GWP) asociado con la producción de madera para cada una de las especies analizadas. Este conjunto de métricas permite una evaluación del impacto climático, desglosando las emisiones de gases de efecto invernadero según su origen y efecto sobre el clima.

Cuadro 24

Indicadores de Impacto Ambiental para la Madera Guanacaste (E. cyclocarpum)

Indicador	Abreviatura	Valor	Unidad
Global warming potential	GWP	-693	kg CO ₂ -eq
Global warming potential (fossil)	GWP _f	114	kg CO ₂ -eq
Global warming potential (biogenic)	GWP _b	-807	kg CO ₂ -eq
Global warming potential (land use change)	GWP _{luc}	0.03365	kg CO ₂ -eq

Cuadro 25

Indicadores de Impacto Ambiental para la Madera Cedro (C. odorata)

Indicador	Abreviatura	Valor	Unidad
Global warming potential	GWP	-748	kg CO ₂ -eq
Global warming potential (fossil)	GWP _f	114	kg CO ₂ -eq
Global warming potential (biogenic)	GWP _b	-862	kg CO ₂ -eq
Global warming potential (land use change)	GWP _{luc}	0.03365	kg CO ₂ -eq

Cuadro 26

Indicadores de Impacto Ambiental para la Madera Pochote (B. quinata)

Indicador	Abreviatura	Valor	Unidad
Global warming potential	GWP	-528	kg CO ₂ -eq
Global warming potential (fossil)	GWP _f	114	kg CO ₂ -eq
Global warming potential (biogenic)	GWP _b	-642	kg CO ₂ -eq
Global warming potential (land use change)	GWP _{luc}	0.03365	kg CO ₂ -eq

Donde:

GWP: Es la medida general del potencial de calentamiento global, expresada en kg CO₂ eq.

GWP_f (fossil): Especifica la contribución de las emisiones fósiles al potencial de calentamiento global, reflejando el impacto de las actividades que queman combustibles fósiles.

GWP_b (biogenic): Representa las emisiones biogénicas de CO₂, las cuales forman parte del ciclo corto de carbono, como la absorción y liberación de carbono por la biomasa.

GWP_{luc} (land use change): Captura las emisiones resultantes de los cambios en el uso del suelo, un factor significativo en la dinámica del carbono terrestre.

Para el Guanacaste (*E. cyclocarpum*), el Cuadro 24 indica un GWP total de -693 kg CO₂-eq, lo que sugiere que la madera de Guanacaste funciona como un sumidero de carbono. Esta característica se debe en gran parte a la considerable absorción biogénica de CO₂ durante el crecimiento del árbol, reflejada en un GWP_b de -807 kg CO₂-eq. Las emisiones de fuentes fósiles, indicadas por un GWP_f de 114 kg CO₂-eq, son superadas por la captura biogénica, resultando en un balance negativo. El impacto del cambio de uso de la tierra es mínimo, con un GWP_{luc} de 0.03365 kg CO₂-eq.

En el caso del Cedro (*C. odorata*), presentado en el Cuadro 25, encontramos un GWP total de -748 kg CO₂-eq, lo que también lo establece como un sumidero de carbono. Al igual que con el Guanacaste, la captura de carbono biogénico es significativa, con un GWP_b de -862 kg CO₂-eq. La contribución de las emisiones fósiles es igualmente de 114 kg CO₂-eq y el GWP_{luc} se mantiene constante en 0.03365 kg CO₂-eq, igual que el Guanacaste.

Finalmente, el Pochote (B. quinata), mostrado en el Cuadro 26, tiene un GWP total de -528 kg CO₂-eq, lo que indica que también actúa como un sumidero de carbono en su evaluación ambiental. El GWP_f es de 114 kg CO₂-eq y el GWP_b es de -642 kg CO₂-eq, mostrando una capacidad de secuestro de carbono más baja que las otras dos maderas, pero aún significativa. El GWP_{luc} es idéntico a los otros dos tipos de madera con 0.03365 kg CO₂-eq.

Estos datos reflejan que, pese a las emisiones asociadas a las fuentes fósiles, el balance general de las tres maderas es negativo en GWP, lo que indica su rol como sumideros de carbono, contrarrestando las emisiones de CO₂ a través de la absorción durante su crecimiento.

Resulta de interés para esta investigación, comparar estos resultados con otras declaraciones ambientales de producto (EPD, por sus siglas en inglés), de productos similares; a continuación, se muestran algunas referencias obtenidas en la web: <https://www.environdec.com/library>

Figura 20.

EPD Structural Softwood Timber, Timberlink

Environmental impact indicators

Table 7. Environmental impact (EN15804+A2) covering modules A1-3, C1-4 and D

Indicator	Abbr	Unit	Production untreated A1-A3
Global warming potential	GWP	kg CO ₂ eq	-711
Global warming potential (fossil)	GWPf	kg CO ₂ eq	119
Global warming potential (biogenic)	GWPb	kg CO ₂ eq	-830
Global warming potential (land use change)	GWPluc	kg CO ₂ eq	0.00992

Fuente: (Timberlink, 2023)

Figura 21.

EPD Softwood Timber, Wood Solutions

Table 7: Environmental impacts, 1 m³ of sawn, kiln-dried softwood.

	Production	Landfill (typical)	Landfill (NGA)	Energy recovery	Recycling
Parameter [Unit]	A1-A3	C4	C4	C3	C3
GWP [kg CO ₂ -eq.]	-764	57.9	364	906	906
GWPF [kg CO ₂ -eq.]	117	56.6	56.8	5.58	5.58
GWPB [kg CO ₂ -eq.]	-881	1.28	307	900	900

Fuente: (thinkstep, 2022a)

Figura 22.

EPD White Cypress Timber, Wood Solutions

Table 3: Environmental impacts, 1 m³ of rough-sawn, green (unseasoned) White Cypress

	Production	Landfill (typical)	Landfill (NGA)	Energy recovery	Recycling
Parameter [Unit]	A1-A3	C4	C4	C3	C3
GWP [kg CO ₂ -eq.]	-1,070	61.0	543	1,230	1,230
GWPF [kg CO ₂ -eq.]	130	58.0	58.2	8.40	8.40
GWPB [kg CO ₂ -eq.]	-1,200	3.05	484	1,220	1,220

Fuente: (thinkstep, 2022b)

Figura 23.

EPD Sawn Timber, CHH Timber

RESULTS FOR 1 m³ OF UNTREATED, SAWN, KILN-DRIED SOFTWOOD

INDICATOR	UNIT	A1-A3	C1	C2	C3	C3	C4	C3	D	D	D	D	
		Production	Decon-struction	Transport to EOL	Recycling	Energy recovery	Landfill (typical)	Reuse	Recycling	Energy recovery	Landfill (typical)	Reuse	
Table 5. Environmental impact (EN15804+A2) covering modules A1-D													
GWP	Global warming potential	kg CO ₂ eq	-761	0.334	1.70	849	849	903	844	-21.9	-585	-0.0526	-82.3
GWPF	Global warming potential (fossil)	kg CO ₂ eq	80.4	0.335	1.63	5.38	5.38	56.2	0	-21.3	-586	-0.0521	-80.4
GWPb	Global warming potential (biogenic)	kg CO ₂ eq	-842	-3.42E-04	0.0721	844	844	847	844	-0.579	1.70	-4.18E-04	-1.94
GWPluc	Global warming potential (land use change)	kg CO ₂ eq	0.0230	6.74E-06	2.56E-05	1.57E-04	1.57E-04	0.0403	0	-0.00872	-0.00762	-9.16E-05	-0.0230

Fuente: (thinkstep-anz ltd, 2023)

Figura 24.*EPD C24 Graded, Jordeson Timber***Potential environmental impact per m³ of timber– mandatory indicators according to EN 15804**

Indicator	Unit	Tot.A1-A3	A4	A5	C2	C3	C4	D
GWP-fossil	kg CO ₂ eq.	4.73E+01	8.39E+00	4.24E+01	4.20E-01	2.58E+00	0.00E+00	-7.62E+02
GWP-biogenic	kg CO ₂ eq.	-7.46E+02	4.99E-03	1.45E+00	2.49E-04	3.27E-03	7.46E+02	7.83E-02
GWP-luluc	kg CO ₂ eq.	1.96E+00	2.83E-03	1.02E-01	1.42E-04	7.98E-04	0.00E+00	-1.18E-01
GWP-total	kg CO ₂ eq.	-6.97E+02	8.40E+00	4.39E+01	4.20E-01	2.58E+00	7.46E+02	-7.62E+02

Fuente: (Dr. Hudai Kara (Metsims Sustainability Consulting), 2022)

Al analizar en detalle los datos presentados en los Cuadros 24, 25 y 26; y las Figuras 15, 16, 17, 18 y 19 de las EPD, se presenta un escenario más amplio de cómo los productos de madera pueden variar en su impacto ambiental dependiendo de su origen y el método de procesamiento. Los valores negativos en el GWP total en todos los casos indican que las maderas estudiadas tienen un efecto de secuestro de carbono, contribuyendo potencialmente a la mitigación del cambio climático.

GWP Fósil (GWP_f):

La comparación de los valores de GWP_f muestra que todas las maderas generan emisiones de CO₂ a partir de fuentes fósiles, lo que es de esperar debido al consumo de energía durante la extracción y procesamiento de la madera.

La EPD de Jordeson Timber (Figura 19) procedente de Suiza, muestra el menor GWP_f entre las referencias con 47 kg CO₂-eq., lo que puede reflejar eficiencias energéticas o el uso de fuentes de energía más limpias durante el procesamiento, pero en general las demás EPD muestran valores cercanos al orden de los 100 kg CO₂-eq, muy acorde a lo obtenido en esta investigación.

GWP Biogénico (GWP_b):

En cuanto al GWP_b , todos los datos muestran una absorción significativa de CO_2 , destacando el rol de las maderas como sumideros de carbono durante su fase de crecimiento. El White Cypress (Figura 17) tiene la absorción más alta con $-1\ 200\ kg\ CO_2\text{-eq.}$, lo que se puede atribuir a su gran densidad.

Los datos de la investigación para el Cedro y el Guanacaste (Cuadros 24 y 25) también muestran una fuerte capacidad de secuestro con $-807\ kg\ CO_2\text{-eq.}$ y $-862\ kg\ CO_2\text{-eq.}$ respectivamente, similares a las otras EPD.

GWP de Cambio de Uso de la Tierra (GWP_{luc}):

Los valores de GWP_{luc} son bajos en todas las referencias, lo que sugiere que el cambio de uso de la tierra tiene un impacto relativamente menor en la huella de carbono total. Esto es relevante para los esfuerzos de conservación y manejo forestal sostenible.

La consistencia entre los valores negativos de GWP total y los positivos de GWP_f en todas las EPD y los datos de la investigación sugiere primeramente que existe una similitud en los procesos de extracción y procesamiento, así como en las prácticas de manejo forestal y segundo que, la captura de carbono durante el crecimiento de la madera compensa las emisiones de carbono fósil para su extracción y procesamiento. Esta compensación es crucial para la evaluación del rendimiento ambiental de los productos de madera y puede ser un factor decisivo para la elección de materiales en la construcción y otras industrias; esto en la búsqueda del carbono neutral en la construcción.

Conclusiones y recomendaciones.

Conclusiones

- La creación de la base de datos para el análisis de ciclo de vida de la tala a la puerta (Cradle to Gate) para el proceso de extracción, transporte e industrialización de la madera de especies nacionales ha permitido caracterizar con precisión cada equipo, consumo y rendimiento. Al contarse con poca información esta base es un testimonio de la complejidad y la variabilidad de las prácticas de manejo forestal e industrial, proporcionando una herramienta fundamental para el análisis y la mejora continua de la sostenibilidad en la cadena de valor de la madera.
- La investigación ha cuantificado el carbono embebido en la biomasa de cada especie, ofreciendo una imagen clara del papel positivo que juega la madera en la captura de carbono. Estos hallazgos son cruciales para valorar la contribución de los bosques gestionados de manera sostenible al balance de carbono global y para enfatizar el uso de la madera como un recurso renovable en la lucha contra el cambio climático.
- La aplicación de la norma INTE/ISO 14067:2019 con la herramienta SimaPro ha revelado diferencias significativas en la huella de carbono entre las especies forestales estudiadas. Esta evaluación rigurosa es un paso adelante en la comprensión de la responsabilidad ambiental y ofrece una base para tomar decisiones informadas en la selección de materiales que alineen las prácticas de construcción y diseño con objetivos de sostenibilidad.
- El potencial de calentamiento global (GWP) para el Guanacaste (*E. cyclocarpum*), se estimó en -693 kg CO₂-eq, para el Cedro (*C. odorata*) en -748 kg CO₂-eq, y finalmente, el Pochote (*B. quinata*) en -528 kg CO₂-eq., reflejando el potencial de la madera nacional como sumidero de carbono debido a una absorción biogénica.
- El análisis detallado de la cadena de suministro ha identificado las etapas críticas donde se concentran las emisiones de carbono, ofreciendo una visión clara de las áreas prioritarias para la intervención. La identificación de estas fuentes principales es un paso vital hacia la mejora de los procesos productivos y la

implementación de prácticas que reduzcan la huella de carbono, respaldando esfuerzos de producción más limpia y eficiente.

Recomendaciones

- Promover la recopilación de datos primarios de cada etapa del ciclo de vida en la industria, para aumentar la representatividad y precisión de la base de datos, y por ende en la estimación de la huella de carbono.
- Estimar la huella de carbono sobre el uso y el fin de vida de la madera, para completar el panorama del ciclo de vida completo.
- Realizar estudios más específicos para estimar de manera más precisa el carbono embebido de cada especie, entendiendo mejor la dinámica de captura en diferentes etapas de crecimiento y en distintas condiciones climáticas.
- Analizar el impacto de distintas técnicas de manejo forestal sobre la captura de carbono para optimizar la gestión sostenible de bosques.
- Considerar la asesoría profesional en producción industrial, con el objetivo de optimizar los procesos, no solo en eficiencia económica sino también en reducción de la huella de carbono.
- Formular políticas o recomendaciones para promover prácticas de manejo forestal que mejoren la captura de carbono, basadas en los resultados de este estudio.
- Establecer criterios de sostenibilidad en la selección de proveedores de materiales de construcción, incluyendo la preferencia por aquellos que cuenten con una declaración ambiental del Producto.
- Desarrollar materiales de comunicación y programas de educación dirigidos a consumidores sobre el impacto ambiental de las diferentes materiales de construcción y la importancia de la declaración ambiental del producto.
- Desarrollar materiales de comunicación y programas de educación dirigidos a productores sobre el impacto ambiental de las diferentes procesos y las prácticas sostenibles en la cadena de valor.

- Fomentar la transparencia en la cadena de suministro de madera, incluyendo la divulgación de la huella de carbono y las prácticas de manejo sostenible, para informar mejor a los consumidores y partes interesadas.
- Incentivar la innovación en tecnologías de procesamiento de madera que reduzcan la huella de carbono, y el uso de energías renovables.

Bibliografía

- Badilla-Arroyo, P., Elizondo-Santiago, J., Fernández-Martínez, T., Méndez-Trejos, J., Mora-Solano, F., & Quesada-Yamasaki, M. (2015). *Cálculo de huella de carbono para materiales de construcción en Costa Rica [Tesis de Licenciatura, Universidad de Costa Rica] SIBDI-UCR*
- Birdsey, R. A. (1992). *Carbon storage and accumulation in United States forest ecosystems*. US Department of Agriculture, Forest Service.
- Bose, B. K. (2002). *Modern Power Electronics and AC Drives*. Prentice Hall PTR.
- Bringezu, S., Ramaswami, A., Schandl, H., O'Brien, M., Pelton, R. E., & Nagpure, A. S. (2017). Assessing global resource use: A systems approach to resource efficiency and pollution reduction.
- Caterpillar. (2024a, *966 GC Cargadores de ruedas medianos | Cat*. Retrieved 2024/02/17, from https://www.cat.com/es_US/products/new/equipment/wheel-loaders/medium-wheel-loaders/115420.html
- Caterpillar. (2024b, *Cargador de Ruedas 950 GC | Cat*. Retrieved 2024/02/17, from https://www.cat.com/es_MX/products/new/equipment/wheel-loaders/medium-wheel-loaders/18548328.html
- Cerdas Ramírez, P. (2018). *Elaboración de una Declaración Ambiental de Producto para un Tablame Premium de Maderas Cultivadas de Costa Rica*
- Chavarria, C. (2024). *Entrevista con Cristian Chavarría sobre el proceso de extracción de madera aserrada*
- Crawford, R. H., Stephan, A. & Prideaux, F. (2019, *Environmental Performance in Construction (EPiC) Database*. Retrieved 2023/10/15, from https://melbourne.figshare.com/articles/book/EPiC_Database/10257728?file=30569184
- De Schryver, A., & Zampori, L. (2022). *Product Carbon Footprint standards: which one to choose?*
- Dr. Hudai Kara (Metsims Sustainability Consulting). (2022). *Environmental Product Declaration for C24 Graded untreated kiln-dried and planed carcassing*. The International EPD® System. S-P-06869

Espíndola, C., & Valderrama, J. O. (2012). Huella del carbono. Parte 1: conceptos, métodos de estimación y complejidades metodológicas. *Información Tecnológica*, 23(1), 163-176.

FCM industrial. (2024, *Sierra de mesa FCM Industrial M243C*. Retrieved 20/02/2024, from <https://fcminternacional.com/producto/sierra-de-mesa-fcm-industrial-m243c-2/>

Forest Products Laboratory. (1987). *Wood handbook: wood as an engineering material*. The Laboratory.

FPInnovations. (2013, *North American Structural and Architectural Wood Products*. Retrieved 2024/01/13, from <https://library.fpinnovations.ca/en/permalink/fpipub42953>

Freightliner. (2024, *Cascadia Specs*. Retrieved 2024/02/17, from <https://www.freightliner.com/trucks/cascadia/specifications/#tab-1>

Gobierno de Costa Rica. (2019a). *Construcción sostenible en el sector público DIRECTRIZ N° 050-MINAE*

Gobierno de Costa Rica. (2019b). *Plan Nacional de Descarbonización 2018-2050*. Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE).

Gobierno de Costa Rica. (2020). *Contribución Nacional Determinada*

Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill.

Husqvarna. (2024, *Motosierra Husqvarna 395 XP®*. Retrieved 2024/02/17, from <https://www.husqvarna.com/co/motosierras/395xp/>

Instituto Meteorológico Nacional. (2023, *Factores de emisión de gases de efecto invernadero 13 edición*. Retrieved 2024/03/20, from <http://cglobal.imn.ac.cr/documentos/publicaciones/factoresemision/factoresemision2023/FactoresEmision-GEI-2023.pdf>

INTECO. (2019). *INTE/ISO 14067:2019, Gases de efecto invernadero - Huella de carbono de productos - Requisitos y directrices para la cuantificación* (1st ed.)

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use*. Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

ISO 14064-1:2018. (2018). *ISO 14064-1:2018. Especificación para la cuantificación y la verificación de las emisiones y la absorción de gases de efecto invernadero. Parte 1: Especificación para la cuantificación de las emisiones y la absorción de gases de efecto invernadero*.

Meier, E. (2024, *The Wood Database*. Retrieved 2020/02/20, from [https://www.wood-database.com/guanacaste/#:~:text=Common%20Name%20\(s\)%3A%20Guanacaste%2C%20Parota%20Scientific%20Name%3A%20Enterolobium,%28440%20kg/m%203%29%20Specific%20Gravity%20\(Basic%2C%2012%25%20MC\)%3A.34%2C.44](https://www.wood-database.com/guanacaste/#:~:text=Common%20Name%20(s)%3A%20Guanacaste%2C%20Parota%20Scientific%20Name%3A%20Enterolobium,%28440%20kg/m%203%29%20Specific%20Gravity%20(Basic%2C%2012%25%20MC)%3A.34%2C.44)

Monge Pérez, J. E., & Loría Coto, M. (s.f.). *Guía ilustrativa del pochote (Bombacopsis quinata)*. Universidad de Costa Rica & Universidad Estatal a Distancia.

Moya-Roque, R., Muñoz-Acosta, F., Salas-Garita, C., Berrocal-Jiménez, A., Leandro-Zúñiga, L., & Esquivel-Segura, E. (2012). Tecnología de madera de plantaciones forestales: Fichas técnicas. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 7(18-19), pág. 1-208. <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/383>

Moya-Roque, R., Muñoz-Acosta, F., Salas-Garita, C., Berrocal-Jiménez, A., Leandro-Zúñiga, L., & Esquivel-Segura, E. (2010). Tecnología de madera de plantaciones forestales: Fichas técnicas. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 7(18-19), ág. 1-208.

Muñoz-Acosta, F. (2012). Sistemas de medición utilizados en Costa Rica para calcular volumen de madera en troza y aserrada. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 3(7), pág. 82-85. <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/531>

- Naciones Unidas. (2015, *Acuerdo de París*. Retrieved 01/11/2023, from https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf
- ONF. (2022). Usos y aportes de la madera en Costa Rica, Estadísticas 2021 y Precios 2022. Oficina Nacional Forestal., 48 p.
- ONU. (2022, *Noticias ONU*. Retrieved 2023/11/09, from <https://news.un.org/es/story/2022/11/1516722>
- Peurifoy, R. L., Ledbetter, W. B., & Schexnayder, C. J. (1996). *Construction Planning, Equipment, and Methods*. McGraw-Hill.
- Puettmann, M. E., & Wilson, J. B. (2005). Life-cycle analysis of wood products: Cradle-to-gate LCI of residential wood building materials. *Wood and Fiber Science*, , 18-29.
- Rodríguez, B. R. (2003). El análisis del ciclo de vida y la gestión ambiental. *Boletín IIE*, , 91-97.
- Rogelj, J., Schleussner, C., & Hare, W. (2017). Getting it right matters: temperature goal interpretations in geoscience research. *Geophysical Research Letters*, 44(20), 10,662-10,665.
- Rojas-Rodríguez, F., & Torres-Córdoba, G. (2014). Árboles del Valle Central de Costa Rica: reproducción cedro amargo (*Cedrela odorata* L.). *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 11(26), ág. 25-27.
- Rojas-Rodríguez, F., & Torres-Córdoba, G. (2020). Trees of the Central Valley of Costa Rica: reproduction guaitil (*Genipa americana* L.). *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 17(40), 61-63.
- Sáenz, S. (2015). *Comparación de la huella de carbono generada al construir las paredes de una vivienda unifamiliar de 45m2 en obra gris, utilizando las emisiones calculadas al usar losas prefabricadas de concreto y al usar Teca [Tesis de Licenciatura, Universidad de Costa Rica] SIBDI-UCR*
- Sahoo, K., Bergman, R., Alanya-Rosenbaum, S., Gu, H., & Liang, S. (2019). Life cycle assessment of forest-based products: A review. *Sustainability (Switzerland)*, 11(17)10.3390/su11174722
- simapro.com. (2023, *About*. <https://simapro.com>. Retrieved 28/10/2023, from <https://simapro.com/about/>

Solano Quesada, S., & Ortiz Malavasi, E. (2016). Metodología de medición de la huella de carbono para edificaciones en Costa Rica y su aplicación en el módulo habitacional Trópika. *Tecnología En Marcha*, 29(3), 73-84.

10.18845/tm.v29i3.2889

Solano Salmerón, J. (2018). *Impacto potencial sobre el cambio climático de las tarimas de madera elaboradas en la Región Huetar Norte de Costa Rica a través de un Análisis de Ciclo de Vida (ACV)*

Solis, C. (2024). *Entrevista con Cesar Solís de la Empresa Ecomundo SRL sobre los procesos de industrialización de la madera aserrada*

Superior Lumber. (2024, Retrieved Mar 27, 2024, from <http://www.lightskies.com/superior-maderas/maderas-duras/pochote-2.html>)

Tenorio, C., Moya, R., Salas, C., & Berrocal, A. (2016). Evaluation of wood properties from six native species of forest plantations in Costa Rica. *Bosque*, 37(1), 71-84.

thinkstep, P. L. (2022a). *Environmental Product Declaration for Softwood Timber*. EPD Australasia Limited. S-P-00560

thinkstep, P. L. (2022b). *Environmental Product Declaration for White Cypress Timber*. EPD Australasia Limited. S-P-02327

thinkstep-anz ltd. (2023). *Environmental Product Declaration for Sawn Timber*. The International EPD® System, EPD Australasia. S-P-05512

Timberlink. (2023). *Structural Softwood Timber: Environmental Product Declaration*. (). Australia: The International EPD® System. S-P-07431 Retrieved from Environmental Product Declaration for Structural Softwood Timber

Tractores Topadores D6 / Cat / Caterpillar.

https://www.cat.com/es_US/products/new/equipment/dozers/medium-dozers/15969751.html. Retrieved Feb 15, 2024, from https://www.cat.com/es_US/products/new/equipment/dozers/medium-dozers/15969751.html

United Nations Environment Programme. (2022). *2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards*

a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector

wikipedia.org. (2024a, -03-19T15:37:11Z). *Cedrela odorata*. Retrieved Mar 24, 2024, from https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Cedrela_odorata&oldid=158910081

wikipedia.org. (2024b, -01-11T17:06:50Z). *Enterolobium cyclocarpum*. Retrieved Mar 24, 2024, from https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Enterolobium_cyclocarpum&oldid=157027430

Yale. (2024, *Montacargas Yale GC030-040SVX*). Retrieved 2024/03/20, from <https://www.yale.com/es-mx/latin-america/montacargas-de-combustion-interna-con-llantas-macizas/gc030-040svx/>

Apéndice

Plan de Manejo Forestal

**PLAN DE MANEJO FORESTAL PARA BOSQUE SECUNDARIO,
SUCESIÓN MEDIA TARDÍA, DISCRETÁNEO.
(Según criterios establecidos por el decreto R-SINAC-CONAC-115-
2017)**

PROYECTO

AGROFORESTALTES DE CADINILLA SA

ELABORADO POR

[Redacted]

1. PLAN GENERAL

1.1 OBJETIVOS DEL PLAN

El Plan de Manejo en Bosque Secundario tiene los siguientes objetivos:

- Obtención de madera para aserrío.
- Cumplir con los Estándares de Sostenibilidad para Manejo de Bosques Secundarios: Principios, Criterios e Indicadores y Código de Prácticas.
- Prescribir tratamientos silviculturales para estimular la regeneración de especies comerciales.

1.2 INFORMACIÓN BÁSICA

Dentro de la categoría de Bosques sin Registros Anteriores se incluyen aquellos bosques intervenidos que, a pesar de haber sufrido intervenciones anteriores, no se cuenta con un registro confiable de las variables silvícolas que permita comparar la condición actual del bosque con la condición del bosque no disturbado o con una línea base.

1.2.1. Antecedentes

La finca no cuenta con registros anteriores confiables de manejo forestal, sin embargo se aportan pruebas para demostrar que el sitio es un bosque secundario en regeneración, las imágenes de satélite muestran que gran parte de la zona es No Bosque. Del análisis se concluye que en la zona existían áreas de repasto y zonas de aprovechamiento boscoso que se sometieron a tasas de cosecha muy fuertes que degradaron el sitio.

En el sitio hay una alta presencia especies vegetales agresivas (Tipo Charral), que tienen que ser manejadas para poder estimular la regeneración y propagación de las especies forestales.

Se omiten los apartados que muestran información confidencial del dueño de la propiedad, dada la solicitud expresa de no compartirla en este estudio.

1.2.6. Vías de acceso

Cuadro 5: Accesibilidad al proyecto según tipo de vía

Recorrido	Distancia (km)	Tipo de vías
Ruta 1 San José-Cruce a Sardinal	125	Asfaltada
Cruce a Sardinal-Escuela de San Rafael	15	Asfaltada
Escuela de San Rafael-Finca	3	Lastre
TOTAL		

1.2.7. Uso de la tierra

Cuadro 6: Distribución del uso actual de la finca

Tipo de uso	Área (ha)	Porcentaje (%)
Área total de bosque secundario	185.101	31.7
Área total para Manejo	185.101	6.1
Área de protección	35.83	0
Otro bosque	0	0
Repastos	362.4	62.1
Uso agrícola		
Infraestructura		
Otros usos		
Total	583.3	100

Descripción general de las áreas adyacentes al bosque:

El área a intervenir colinda con otras áreas de Potreros, los cuales tienen muchos años de hechos, aunque estas áreas de bosque secundario, hace muchos años, formaban parte de los potreros.

1.2.8. Ubicación y tipificación del bosque en el contexto del paisaje forestal circundante.

Para este sitio no existen mapas de tipos de bosque disponibles, ni tampoco para áreas circundantes. El área se puede tipificar como Bosque Tropical seco, de acuerdo al sistema de clasificación de zonas de vida de Holdridge.

1.3. IMPACTO DEL APROVECHAMIENTO SOBRE LA MASA RESIDUAL Y EL SUELO Y MEDIDAS DE MITIGACIÓN.

El impacto del aprovechamiento sobre la masa residual y el suelo está contemplado dentro de los Principios, Criterios e Indicadores y el Código de Prácticas para el manejo de bosques secundarios, específicamente en los Principios 2 y 3. Los elementos para su evaluación y las correspondientes medidas de mitigación son los siguientes:

- Se deben respetar diámetros mínimos de corta para evitar disminuir la capacidad de regeneración de las especies manejadas.
- Se debe respetar la intensidad de corta propuesta para la UMF.
- La infraestructura establecida para el manejo forestal no debe presentar signos de que altere la calidad del agua en el sitio. Los caminos primarios tienen las obras de conservación necesarias para minimizar la erosión y la sedimentación excesiva en los elementos hidrológicos.

2. PLAN OPERATIVO

2.1. CENSO

Se realizó un censo pie a pie sobre el área efectiva total del bosque de todos los árboles con diámetros mayores a un dap mayor al límite menor de la clase diamétrica inmediatamente inferior al DMC actual por especie. Las áreas productivas no incluyen aquellas áreas de protección definidas en la ley 7575 (artículos 33 y 34).

2.1.1. Diseño del censo

Utilizando los transeptos del inventario forestal y un aparato para ubicación de posicionamiento global (GPS) marca Garmin, se realizó un recorrido total del área productiva para el censo de la masa a cosechar. El censo se realizó de la siguiente forma:

- Se realizó sobre el área efectiva.
- Todos los árboles contemplados dentro del censo comercial, incluyendo los árboles a cosechar, los árboles comerciales remanentes y los árboles de especies vedadas y restringidas están marcados con pintura en el fuste.
- Los árboles están identificados con un número único consecutivo.
- Los árboles a cosechar están identificados con una X pintada en el fuste de manera que la marca es fácilmente visible a la hora de ejecutar las actividades de corta.
- En el mapa base de aprovechamiento se identifican claramente todos los árboles contemplados dentro del censo comercial.
- A cada árbol se le midió su dap en centímetros y se estimó su altura comercial en metros. Además se determinó su ubicación espacial dentro del área de bosque.

2.1.2. Evaluación de los resultados del censo forestal

Cuadro 8. Distribución diamétrica del número de árboles a cortar con base en el censo forestal.

Suma de cantidad	Clase DAP (cm)									
Especie	>110	100-110	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	Total general
jobo					3	15	3		1	22
areno							5	1		6
campano					2		1			3
campano blanco						1				1
cedro amargo	2					7	10	3	5	27
cedro maria					1	1				2
ceibo	3								1	4
cenizaro	1	3								4
Chaperno					3	8	6	1	1	19
chilamate		1					1	1		3
espavel	1							2	1	4
Gallinazo	10	16					17	36	21	100
guabo colorado					1	1				2
Guanacaste	47	25					3	15	27	117
guapinol					1	1			1	3
ira					3	4	1			8
jincocuabe				1	1	1				3
jobo						1				1

lagarto negro					1					1
laurel			1							1
lechillo					2	5				7
nispero		1				5	4		5	15
Nispero Coyolillo	2									2
ojoche						4		1		5
pochote	1	4				15	28	14	9	71
quebracho						1				1
roble sabana						2				2
sura						3	1			4
Total general	67	50	1	1	18	75	80	74	72	438

Cuadro 9. Distribución diamétrica del área basal de los árboles a cortar con base en el censo forestal.

Suma de Área basal (m ²)	Categoría DAP (cm)										
Especie	>110	100-110	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	Total general	
jobo					0,85	5,17	1,45		0,8	8,2	
areno							2,24	0,61		2,8	
campano					0,50		0,41			0,9	
campano blanco						0,35				0,4	
cedro amargo	2,58					2,55	4,76	1,88	3,9	15,7	
cedro maria					0,22	0,33				0,6	
ceibo	6,30								0,7	7,0	
cenizaro	1,33	2,68								4,0	
Chaperno					0,80	2,79	2,68	0,61	0,8	7,7	
chilamate		0,95					0,48	0,53		2,0	
espavel	1,77							1,18	0,8	3,7	
Gallinazo	11,84	14,65					8,14	21,25	15,6	71,5	
guabo colorado					0,21	0,33				0,5	
Guanacaste	75,25	23,39					1,48	9,06	20,9	130,1	
guapinol					0,24	0,38			0,7	1,3	
ira					0,80	1,31	0,48			2,6	
jinocuabe				0,20	0,23	0,34				0,8	
jobo						0,35				0,4	
lagarto negro					0,23					0,2	
laurel			0,13							0,1	
lechillo					0,55	1,69				2,2	
nispero		0,80				1,84	1,97		3,7	8,3	
Nispero Coyolillo	2,46									2,5	
ojoche						1,37		0,64		2,0	
pochote	1,13	3,73				5,45	13,16	8,12	6,8	38,4	
quebracho						0,38				0,4	
roble sabana						0,68				0,7	
sura						1,07	0,48			1,5	
Total general	102,65	46,21	0,13	0,20	4,63	26,39	37,72	43,86	54,7	316,5	

Cuadro 10. Distribución diamétrica del volumen comercial de los árboles a cortar con base en el censo forestal.

Suma de Volumen (m ³)	Categoría DAP (cm)									
Especie	>110	100-110	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	Total general
jobo					7,218	40,987	9,277		6,052	63,535
areno							21,939	5,720		27,660
campano					3,777		2,603			6,380
campano blanco						3,475				3,475
cedro amargo	21,272					21,335	38,585	13,674	31,598	126,464
cedro maria					2,154	2,514				4,668
ceibo	69,369								7,363	76,732
cenizaro	12,680	21,711								34,391
Chaperno					8,362	21,545	21,165	5,022	5,087	61,181
chilamate		9,554					8,087	4,953		22,594
espavel	12,749							7,134	5,575	25,458
Gallinazo	127,896	135,238					78,330	184,010	133,549	659,023
guabo colorado					2,187	2,897				5,084
Guanacaste	674,106	180,125					13,337	69,415	150,557	1087,539
guapinol					1,788	1,964			3,177	6,928
ira					7,562	12,156	4,738			24,456
jinocuabe				1,806	1,855	2,793				6,453
jobo						3,082				3,082
lagarto negro					2,483					2,483
laurel			0,860							0,860
lechillo					4,127	13,410				17,537
nispero		7,119				14,421	16,126		33,098	70,765
Nispero Coyolillo	29,239									29,239
ojoche						11,732		5,989		17,721
pochote	5,897	29,065				42,286	94,362	58,142	52,835	282,587
quebracho						1,704				1,704
roble sabana						5,386				5,386
sura						9,929	4,202			14,131
Total general	953,205	382,812	0,860	1,806	41,513	211,615	312,752	354,060	428,891	2687,514

Cuadro 11. Distribución diamétrica del número de árboles comerciales remanentes con base en el censo forestal.

Suma de Cantidad	Categoría DAP (cm)								
Especie	100-110	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	Total general
areno				5	1				6
caimito de montaña				1					1
campano			2	1					3
campano blanco				1	1				2
cedro amargo			12	8	8				28
cedro maria			1	1					2
ceibo				1		1	2		4
cenizaro						1		3	4
Chaperno			4	11	4				19
chilamate				1	1				2
espavel				2	3				5
Gallinazo		1	7	18	52	18	5		101
guabo colorado				2					2
guaitil			1						1
Guanacaste	1		4	20	34	34	23	2	118
guapinol			1	2					3
ira			3	6					9
jinocuabe			2	2					4
jobo			7	15	2				24
jocote negro			1						1
lagarto negro			1	1					2
laurel		1							1
lechillo			1	6					7
mangle				1					1
nispero			3	8	4				15
Nispero Coyolillo		1			1	1			3
ojoche				3	3				6
piedrilla			1						1
pochote			11	34	24	2			71
quebracho				2					2
roble sabana			1	2					3
sura			2	2		1			5
zopilote				1					1
Total general	1	3	65	157	138	58	30	5	457

Cuadro 12. Distribución diamétrica del área basal de los árboles comerciales remanentes con base en el censo forestal.

Suma de Área basal (m ²)	Categoría DAP (cm)								
Especie	100-110	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	Total general
areno				1,29	0,38				1,67
caimito de montaña				0,24					0,24
campano			0,39	0,22					0,61
campano blanco				0,20	0,34				0,55
cedro amargo			2,21	1,97	2,55				6,73
cedro maria			0,20	0,21					0,41
ceibo				0,28		0,48	1,27		2,03
cenizaro						0,50		2,28	2,78
Chaperno			0,79	2,87	1,29				4,94
chilamate				0,26	0,38				0,64
espavel				0,50	1,07				1,57
Gallinazo		0,00	1,24	4,87	17,91	8,32	2,73		35,08
guabo colorado				0,42					0,42
guaitil			0,20						0,20
Guanacaste	0,88		0,77	5,10	11,93	16,29	13,02	1,45	49,45
guapinol			0,20	0,57					0,76
ira			0,59	1,40					1,99
jinocuabe			0,39	0,49					0,88
jobo			1,37	3,67	0,61				5,66
jocote negro			0,20						0,20
lagarto negro			0,20	0,20					0,40
laurel		0,07							0,07
lechillo			0,20	1,44					1,63
mangle				0,23					0,23
nispero			0,59	1,95	1,39				3,93
Nispero Coyolillo		0,01			0,33	0,50			0,84
ojoche				0,83	0,94				1,77
pedrilla			0,20						0,20
pochote			2,11	8,68	8,17	0,97			19,93
quebracho				0,55					0,55
roble sabana			0,20	0,48					0,67
sura			0,39	0,49		0,40			1,27
zopilote				0,20					0,20
Total general	0,88	0,08	12,42	39,61	47,31	27,45	17,02	3,73	148,51

Cuadro 13. Distribución diamétrica del volumen comercial de los árboles comerciales remanentes con base en el censo forestal.

Suma de Volumen (m ³)	Categoría DAP (cm)								
Especie	100-110	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	Total general
areno				11,780	1,964				13,744
caimito de montaña				1,925					1,925
campano			3,391	1,658					5,048
campano blanco				1,651	2,389				4,039
cedro amargo			15,676	15,059	19,586				50,321
cedro maria			1,913	2,072					3,985
ceibo				2,775		5,000	10,870		18,645
cenizaro						2,908		14,173	17,081
Chapemo			6,778	21,163	7,913				35,853
chilamate				0,942	2,214				3,156
espavel				3,494	7,559				11,053
Gallinazo		0,005	9,433	38,427	151,553	61,992	17,184		278,593
guabo colorado				3,370					3,370
guaitil			1,472						1,472
Guanacaste	3,972		5,128	38,847	75,663	96,873	78,780	7,394	306,657
guapinol			1,237	2,663					3,900
ira			4,183	11,629					15,812
jinocuabe			2,828	3,327					6,154
jobo			9,462	25,130	4,099				38,691
jocote negro			1,913						1,913
lagarto negro			2,018	1,651					3,669
laurel		0,478							0,478
lechillo			1,696	10,106					11,803
mangle				2,238					2,238
nispero			4,059	14,198	10,044				28,302
Nispero Coyolillo		0,076			2,514	3,839			6,428
ojoche				7,050	7,254				14,304
piedrilla			1,237						1,237
pochote			14,863	62,472	50,668	4,623			132,626
quebracho				2,753					2,753
roble sabana			1,356	4,111					5,467
sura			3,277	4,135		2,772			10,185
zopilote				1,880					1,880
Total general	3,972	0,559	91,920	296,504	343,419	178,007	106,834	21,567	1042,782

Cuadro 14. Resumen del número de árboles a cortar y árboles comerciales remanentes por especie.

Especie	X	%X	R	%R	Total
areno	6	50,0	6	50,0	12
caimito de montaña		0,0	1	100,0	1
campano	3	50,0	3	50,0	6
campano blanco	1	33,3	2	66,7	3
cedro amargo	27	49,1	28	50,9	55
cedro maria	2	50,0	2	50,0	4
ceibo	4	50,0	4	50,0	8
cenizaro	4	50,0	4	50,0	8
chaperno	19	50,0	19	50,0	38
chilamate	3	60,0	2	40,0	5
espavel	4	44,4	5	55,6	9
gallinazo	100	49,8	101	50,2	201
guabo colorado	2	50,0	2	50,0	4
gualtil		0,0	1	100,0	1
guanacaste	117	49,8	118	50,2	235
guapinol	3	50,0	3	50,0	6
ira	8	47,1	9	52,9	17
jinocuabe	3	42,9	4	57,1	7
jobo	23	48,9	24	51,1	47
jocote negro		0,0	1	100,0	1
lagarto negro	1	33,3	2	66,7	3
laurel	1	50,0	1	50,0	2
lechillo	7	50,0	7	50,0	14
mangle		0,0	1	100,0	1
nispero	15	50,0	15	50,0	30
níspero coyolillo	2	40,0	3	60,0	5
ojoche	5	45,5	6	54,5	11
pedrilla		0,0	1	100,0	1
pochote	71	50,0	71	50,0	142
quebracho	1	33,3	2	66,7	3
roble sabana	2	40,0	3	60,0	5
Surá	4	44,4	5	55,6	9
zopilote		0,0	1	100,0	1
TOTAL	438	48,9	457	51,1	895

Cuadro 15. Lista de Especies del Plan de Manejo, DAP de corta e Intensidad de cosecha.

Especie	Nombre Científico	DAP Mínimo de corta SINAC- CONAC- 115-207)	de (R- Intensidad de corta
areno	<i>Humiriastrum diguense</i>	30	50%
caimito de montaña	<i>Pouteria caimito</i>	30	50%
campano	<i>Vantanea barbourii</i>	30	50%
campano blanco	<i>Ilex skutchii</i>	30	50%
cedro amargo	<i>Cedrela odorata</i>	30	50%
cedro maria	<i>Calophyllum brasiliense</i>	30	50%
ceibo	<i>Ceiba pentandra</i>	30	50%
cenizaro	<i>Samanea saman</i>	30	50%
chaperno	<i>Lonchocarpus sp.</i>	30	50%
chilamate	<i>Ficus insipida</i>	30	50%
espavel	<i>Anacardium excelsum</i>	30	50%
gallinazo	<i>Schizolobium parahyba</i>	30	50%
guabo colorado	<i>Inga oerstediana</i>	30	50%
guaitil	<i>Genipa americana</i>	30	50%
guanacaste	<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	30	50%
guapinol	<i>Hymenaea courbaril</i>	30	50%
ira	<i>Ocotea sp.</i>	30	50%
jinocuabe	<i>Bursera simarouba</i>	30	50%
jobo	<i>Spondias mombin</i>	30	50%
jocote negro	<i>Spondias purpurea</i>	30	50%
lagarto negro	<i>Lacmellea panamensis</i>	30	50%
laurel	<i>Cordia alliodora</i>	30	50%
lechillo	<i>Ficus sp.</i>	30	50%
mangle	<i>Symphonia globulifera</i>	30	50%
nispero	<i>Manilkara zapota</i>	30	50%
nispero coyolillo	<i>Pouteria sp.</i>	30	50%
ojoche	<i>Brosimum alicastrum</i>	30	50%
pieдрilla	<i>Licania arborea</i>	30	50%
pochote	<i>Pachira quinata</i>	30	50%
quebracho	<i>Lysiloma divaricatum</i>	30	50%
roble sabana	<i>Tabebuia rosea</i>	30	50%
Surá	<i>Terminalia oblonga</i>	30	50%
zopilote	<i>Hemandia stenura</i>	30	50%
TOTAL	33 especies		

2.2. LAS OPERACIONES DE CORTA.

Se calcula el volumen comercial total presente en el bosque con el propósito de permitir su sostenibilidad, equivalente a 2687.514 metros cúbicos estimados para los árboles de corta. No se producirán claros de considerable tamaño en el área, lo cual fue planificado en el momento de realizar el censo comercial. De igual forma, se vigilará la caída de los árboles para evitar daños mayores al bosque remanente. La operación de corta y extracción se hará con dos motosierras convencionales, una de ellas para la operación de corta y otra como complemento a la labor del tractor D5 o equivalente, los que se movilizarán por las pistas de arrastre y extraerán con cable aquellos árboles localizados en las zonas de aprovechamiento. Los árboles remanentes serán respetados y protegidos, lo mismo que las zonas de protección. Los árboles están identificados en el campo, tal como se indica en el mapa respectivo.

Arrastre o transporte menor

Los fustes serán arrastrados hasta el patio donde se realizarán las labores de troceo y dimensionado de calidad para lograr un adecuado uso a los residuos.

2.3. LAS OPERACIONES DE EXTRACCIÓN.

La extracción es el proceso de transporte de los árboles rollizos desde la zona de corta hasta un cargadero o patio de acopio donde serán convertidos en trozas para su transporte a la industria o hacia otro destino final. Existen varios sistemas de extracción reconocidos: por arrastre, con vehículos que transportan la carga levantada del suelo, con cable, aérea, con animales de tiro, entre otros (Ver Dykstra y Heinrich 1996).

El plan de manejo efectuado para esta finca, contempla la corta, extracción y transporte de madera a ser efectuado en el año 2022, con desarrollo de las actividades forma planificada y ordenada en tiempo y espacio. Durante este período se aprovechará el Plan Operativo correspondiente a 185.1 hectáreas para el año 2022.

2.4. LAS OPERACIONES DE CARGA.

Los cargaderos o patios de acopio son lugares en los que se reúnen las trozas durante el proceso de extracción. En los puntos de carga se clasifican o almacenan temporalmente las trozas para luego transportarlas a las industrias o a otro destino final (Ver Dykstra y Heinrich 1996).

Cuando sea posible, los cargaderos deben ubicarse en una zona con ligera pendiente. Este caso en específico el cargadero quedara fuera del area efectiva pero dentro de la misma finca. Se recomienda una pendiente del 2% (1 grado). Las zonas abiertas alejadas de los cursos del agua son el mejor emplazamiento. Los puntos de carga han de estar bien drenados y sus canales no deben desembocar directamente en los arroyos, sino en la vegetación circundante. La distancia mínima entre los cargaderos y los cursos de agua ha de ser de 30 m, o bien mayor cuando el terreno es empinado. Para impedir que el agua de escorrentía se acumule en el cargadero durante los períodos de lluvia es necesario construir zanjas y tubos de drenaje en la parte de la montaña del cargadero, especialmente en los lugares en los que penetran las vías de arrastre (Ver Dykstra y Heinrich 1996).

Los cargaderos han de tener la menor extensión posible que permita desenganchar las trozas del equipo de extracción, clasificación, clasificarlas y almacenarlas temporalmente y cargarlas en los camiones u otros vehículos de transporte; entre 500 y 1000 m² parece una superficie razonable cuando se han de manipular trozas de grandes dimensiones. Para trozas de tamaño más reducido y sistemas de extracción poco mecanizados se requiere una superficie menor (Ver Dykstra y Heinrich 1996).

Es necesario adoptar medidas para impedir el derrame de combustible y lubricante en el curso de las operaciones de reparación y mantenimiento. Para impedir el vertido de contaminantes en los arroyos o la capa freática, las zonas reservadas para el reabastecimiento de combustibles y lubricantes deben aislarse con diques (Ver Dykstra y Heinrich 1996).

2.5. LAS OPERACIONES DE TRANSPORTE.

El transporte con camiones debe realizarse de tal manera que se reduzca al mínimo el daño a las carreteras, para lo cual las operaciones de transporte deben ajustarse a la capacidad de carga de la carretera. Una vez que se ha eliminado el agua de la superficie, la exposición al sol, aunque solo sea durante una hora, puede reducir los daños considerablemente. Incluso en las regiones donde las precipitaciones son intensas, el número de días secos o parcialmente secos suele ser suficiente para organizar un calendario regular de las operaciones (Ver Dykstra y Heinrich 1996).

Los caminos y cargaderos de tierra no deben utilizarse durante los períodos de lluvias intensas. Las carreteras que han de ser transitadas durante la estación lluviosa deben ser drenadas adecuadamente (Ver Dykstra y Heinrich 1996).

El peso de la carga de los camiones debe determinarse no sólo en función de la capacidad del camión (que depende de su potencia, sistema de suspensión, transmisión, distancia entre ejes y sistema de frenos) sino de la capacidad de las carreteras por las que debe circular y de las estructuras de drenaje. Este tipo de información se ha de tener en cuenta también para elegir los camiones que deben circular por una zona determinada (Ver Dykstra y Heinrich 1996).

2.6 TRATAMIENTOS SILVICULTURALES.

De ser necesario, posteriormente se adjuntará un Plan Operativo especial con la Evaluación Poscosecha correspondiente y la prescripción ampliamente justificada (Ver Hutchinson 1993).

Bibliografía mencionada en el plan operativo:

- Dykstra, P; Heinrich, R. 1996. Código modelo de prácticas de aprovechamiento forestal de la FAO. Roma, IT, FAO.
- Hutchinson, I. 1993. Puntos de partida y muestreo diagnóstico para la silvicultura de bosques naturales del trópico húmedo. Colección Silvicultura y Manejo de Bosques Naturales no. 7. Turrialba, CR, CATIE. 32 p. (Serie Técnica. Informe Técnico no.204).

2.7. EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL Y MEDIDAS DE MITIGACIÓN EN EL PLAN ANUAL OPERATIVO DE LA UNIDAD DE MANEJO FORESTAL.

2.7.1. Información relacionada con el uso de combustibles fósiles.

Los combustibles fósiles que se utilizarán son Diesel y Gasolina, además de los respectivos aceites lubricantes, los cuales serán almacenados en estañones y recipientes tipo "pichinga", que se mantendrán en bodegas en un lugar seguro fuera del bosque. Los cambios de aceite también se realizarán fuera del bosque, con el fin de evitar derrames dentro del área a aprovechar, que puedan afectar las fuentes de agua.

2.7.2. Información relacionada con el abastecimiento de agua potable.

El agua para consumo humano será tomada de las nacientes y quebradas que están dentro y cerca de la propiedad. En la medida de lo posible, también se transportará desde fuera de la finca.

2.7.3. Información relacionada a desechos en general.

Los desechos inorgánicos serán trasladados fuera de la finca a un relleno donde se les dará el tratamiento adecuado, los orgánicos biodegradables serán enterrados o acumulados en un lugar dentro o cerca a la finca, de manera que se reutilicen como abono. El campamento estará fuera del sitio, en un lugar debidamente acondicionado para el manejo de los residuos.

2.7.4. Manejo de aguas residuales (aguas negras).

No se construirán letrinas dentro del bosque ni en ningún lugar aledaño.

2.7.5. Personal que laborará en la actividad.

La actividad generará de 6 a 8 empleos directos, producto de las labores propias del aprovechamiento, como sierrero, transportistas, operarios y asistentes. Las personas que provienen de lugares lejanos al sitio se instalarán en una casa abandonada cercana a la finca, preliminarmente se estima que la mitad del personal provendrá de comunidades aledañas.

2.7.6. Uso de agroquímicos.

No se utilizarán agroquímicos en ninguna fase del proyecto.

2.7.7. Viabilidad ambiental de SETENA.

En este caso, no se requiere de la viabilidad ambiental de SETENA, debido a que la finca no se encuentra en ningún área protegida.

2.8. Mapas

Los mapas se anexan al documento.

Equipos

Motosierra

Inicio / Motosierras / 395 XP®



Motosierras a gasolina

395 XP(r)**94 cm³**
Cilindrada**4.9 kW**
Potencia**19.6 m/s**
Vel. de cadena a
potencia máx.

- Sistema Air Injection®
- Bomba de aceite regulable
- Cierre rápido del filtro de aire
- [Ver todas las funciones](#)

ENCUENTRA UN DISTRIBUIDOR

Especificaciones

Cilindrada (cc):	93.6
Potencia (Hp):	7.1
Longitud de Barra (Pulgadas):	34
Paso de Cadena (Pulgadas):	.404
Tanque de Combustible (L):	0.9
Depósito de Aceite (L):	0.5
Velocidad de Cadena (m/s):	19.6
Peso (Kg):	7.9
Nivel de Presión en Oído (dB(A)):	102
Niveles de Vibraciones equivalentes (m / s ²):	6.5

Fuente: (Husqvarna, 2024)

Tractor



ENGINE



Engine Model	Cat C9.3B
Power - Net	215 HP
Net Power - Rated - ISO 9249/SAE J1349	215 HP
Net Power (Rated) - ISO 9249 (DIN)	219 mhp

Fuente: (Tractores Topadores D6 | Cat | Caterpillar.)

Cargador (En Finca)



ENGINE



Engine Power @ 1,600 rpm - ISO 14396:2002	321 HP
Gross Power @ 1,600 rpm - SAE J1995:2014	325 HP
Engine Model	Cat C9.3B
Net Power @ 1,600 rpm - ISO 9249:2007, SAE J1349:2011	303 HP

Fuente: (Caterpillar, 2024a)

Camión



SPECS

CONFIGURATION Inline 6 Cylinder

DISPLACEMENT 781 cu in (12.8 L)

COMPRESSION RATIO 20.3:1

HORSEPOWER 370-525; 425-450 (IDP)

TORQUE 1250-1850 LB-FT; 1750 LB-FT (IDP)

SERVICE FILL [OIL & FILTER CHANGE] 40 qt (38L)

Fuente: (Freightliner, 2024)

Cargador (En industria)



ENGINE



Net Power - ISO 9249	225 HP
Emissions	Tier 4/Stage V
Displacement	428 in ³
Maximum Net Power - 1,700 rpm - ISO 9249 - Metric	228 HP
Maximum Power - 1,700 rpm - ISO 14396	240 HP
Maximum Power - 1,700 rpm - ISO 14396 - Metric	243 HP

Fuente: (Caterpillar, 2024b)

Aserradero





Cuadro 27. Motores del Aserradero

Nombre	Capacidad de motores (HP)
Motor 1. Principal Sierra	75
Motor 2. Bomba Hidráulica	25
Motor 3.	2
Motor 4.	1.5
Motor 5. Carro de Avance	3

Fuente: (Solís, 2024)

Sierra



Fuente: (FCM industrial, 2024)

Montacargas



LPG Engine Specifications

Engine	PSI 2.0L
Cylinders	4
Camshaft	Overhead Valve
Displacement	122 cu.in/2.0 liter
Torque	100 lb.ft. @ 1300 RPM
Horsepower	44 hp
Air Filtration	Two Stage, Dry Type
Emission Control	Closed loop

Fuente: (Yale, 2024)