



Análisis De Ciclo de Vida Para Los Procesos De Producción Forestal En México

Juan Quintanar-Olguin¹, Patricia Aguilar-Sánchez¹

¹ Centro de Investigación Región Golfo Centro, Campo Experimental. San Martinito
Km 56.5 Carretera México - Puebla, 74100 Tlahuapan, Pue.

Corresponding Author: Juan Quintanar Olguin

RESUMEN: En la búsqueda de la sostenibilidad forestal, se requiere de la aplicación de un método para determinar el desempeño ambiental de la producción de los diversos productos que se obtienen para el consumo humano. El análisis del ciclo de vida (ACV) es una herramienta completa para medir el impacto ambiental de los productos durante todo su ciclo de vida desde la cuna hasta la tumba, proporcionando datos sobre los flujos de materiales y de energía al obtener diferentes productos. El objetivo de este artículo es: describir los fundamentos metodológicos del ACV; modelado del inventario del ciclo de vida y la aplicación de los indicadores de desempeño ambiental del proceso de producción forestal. El uso actual del ACV en el sector forestal a nivel mundial se puede clasificar en cuatro temas básicos: evaluaciones de impacto en el proceso de producción y transporte de productos de madera; evaluaciones de impacto del uso de energía de la madera; generación de datos para la creación de inventarios de productos de madera y monitoreo para la implementación de ACV, teniendo como límites del sistema de la cuna a la puerta. En México, solo se han realizado dos estudios de ACV en el sector forestal.

PALABRAS CLAVE: Metodología, inventario ciclo de vida, impacto ambiental.

ABSTRACT: Search for forest sustainability, a method is required to determine the environmental performance of the production of the various products obtained for human consumption. The life cycle analysis (LCA) is a complete tool to measure the environmental impact of the products throughout their life cycle from the cradle to the grave, providing data on the flows of materials and energy to obtain different products. The objective of this article is: to describe the methodological foundations of LCA; life cycle inventory modeling and the application of environmental performance indicators of the forest production process. The current use of LCA in the forestry sector worldwide can be classified into four basic themes: impact assessments in the process of production and transport of wood products; impact evaluations of wood energy use; generation of data for the creation of inventories of wood products and monitoring for the implementation of LCA, having as limits the system from the cradle to the door. In Mexico, only two studies of LCA have been carried out in the forestry sector.

KEYWORDS: Methodology, life cycle inventory, environmental impact.

Received 28 April, 2021; Revised: 10 May, 2021; Accepted 12 May, 2021 © The author(s) 2021.

Published with open access at www.questjournals.org

I. INTRODUCTION

La intervención del hombre en la naturaleza comenzó hace miles de años, sin embargo, el uso irracional de los recursos y la contaminación han generado un desequilibrio ecológico, por lo que, la conciencia por proteger el medio ambiente ha crecido significativamente en los últimos años, poniendo de manifiesto la necesidad de que todos los sectores productivos, controlen y contribuyan a la reducción de las acciones perjudiciales para el medio ambiente.

Los problemas ambientales relacionados con la deforestación, la degradación de los bosques y la pérdida de la biodiversidad han conducido a una imagen negativa de la producción forestal, sin embargo, la evaluación de la sostenibilidad ambiental de la producción forestal es a menudo un primer paso hacia el cambio de los procesos de producción para reducir los impactos ambientales negativos. Actualmente, la herramienta más común utilizada a nivel mundial para analizar los impactos ambientales de un producto o servicio desde el origen de su materia prima hasta que se extingue su vida útil, es el análisis del ciclo de vida (ACV o LCA por

sus siglas en inglés). Tradicionalmente se ha usado para determinar los impactos ambientales, sin embargo, en años recientes se ha avanzado en la inclusión de valores económicos y sociales en un ACV estándar [1].

En relación con las opciones metodológicas disponibles para los estudios de ACV, existe el modelo atribucional (ACVA) y el modelo consecuente o híbrido (ACVC), por lo que su aplicación depende del propósito y el alcance del estudio a realizar; los modelos difieren por el método aplicado para calcular las emisiones asociadas con procesos multifuncionales. El modelo ACVA se basa en la asignación de la distribución de emisiones entre los productos principales, intermedios y subproductos, en función de las propiedades físicas, como la masa o la energía bruta que se utiliza para su elaboración o su valor de mercado. El modelo ACVC tiene como base la expansión del sistema, considerando los productos intermedios y subproductos como resultado de procesos de producción independientes al proceso que origina al producto principal. Estos procesos independientes se incluyen dentro de los límites del sistema, sus impactos relativos se calculan y restan de los del proceso multifuncional [1] and [2].

Desde el punto de vista del contexto de producción forestal, el ACV es una herramienta para evaluar los sistemas de suministro de madera, aunque básicamente solo analizan el aporte directo de energía del proceso y descuidan las cargas ambientales de los procesos aguas arriba, dando como resultado una subestimación de los impactos ambientales o una sobreestimación del desempeño ambiental [3], por lo que de acuerdo con [4], el modelo ACVC es un método apropiado para evaluar la sostenibilidad de los recursos forestales. Sin embargo, con un ACV no se puede certificar un área particular de bosque se está manejando de manera sostenible [5], ya que tiene limitaciones por evaluar de forma aislada los impactos ambientales sin tener en cuenta los impactos de los mecanismos sociales y económicos [6]. Más allá de las limitaciones de los alcances de los estudios de ACV, mediante su desarrollo es factible identificar las contribuciones más importantes a los impactos ambientales de la producción forestal, además, facilita la planificación de esfuerzos para minimizar los posibles impactos adversos sobre el medio ambiente y la salud humana [7] and [8].

En relación a la aplicación del ACV al sector forestal a nivel mundial, los primeros estudios a nivel piloto se realizaron en la década final de los '90s del siglo pasado [9], donde se compara la diferencia de impactos ambientales entre la producción industrial de productos forestales con los principales materiales usados en la construcción. El uso de los ACV en el sector forestal se puede clasificar en cuatro formas básicas: evaluaciones de impacto en cualquier parte del proceso de producción y transporte de productos de madera; evaluaciones de impacto del uso de energía de la madera; generación de datos para la creación de inventarios de productos de madera y monitoreo para la implementación de ACV [10] and [11].

En México, el concepto de ACV se utilizó por primera vez a fines de la década de 1990, a nivel académico para la evaluación de plantas de tratamiento de aguas residuales y celdas de combustible de hidrógeno, y por parte del sector gubernamental fue a través del Instituto Nacional de Ecología al realizar investigaciones sobre la gestión de residuos y envases [12] and [13]. En relación con estudios de ACV en el sector forestal en México su uso ha sido muy limitado, solo existen dos trabajos realizados: uno relacionado con la evaluación de impactos ambientales de la producción de los productos forestales maderables: madera aserrada seca, tablero finger joint y mueble escolar [10] y otro relacionado con la producción de una mesa de comedor a base de madera [14].

Ante el aumento de la producción de productos derivados de la biomasa forestal, es urgente determinar y cuantificar el impacto ambiental que generan, esto mediante la aplicación de la metodología análisis de ciclo de vida a la producción forestal, bajo esta consideración, el objetivo del presente artículo es revisar el estado del conocimiento del análisis del ciclo de vida, abordando tres cuestiones: 1) Fundamentos metodológicos del ACV, 2) Modelado del inventario de ciclo de vida y 3) Aplicación de Indicadores de desempeño ambiental para el sistema de producción forestal.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

El proceso metodológico de la investigación es de tipo exploratorio-descriptivo del concepto de ACV y su posible aplicación en el sector forestal, sustentada en con base en revisión bibliográfica y su análisis, por lo que sus resultados no son generalizables de manera estadística sino más bien una propuesta descriptiva para la implementación de un ACV que consta de cuatro etapas iterativas: definición de objetivos y alcance, análisis de inventario, evaluación de impacto e interpretación [15], a fin de cuantificar las emisiones relevantes y los recursos consumidos desde la producción de madera en rollo hasta la eliminación o reciclaje y los impactos relacionados con el medio ambiente y el agotamiento de los recursos.

El procedimiento básico para el desarrollo y aplicación de un ACV consta de cuatro etapas fundamentales [16]:

Etapas 1. Definición del objetivo y alcance del estudio. En la definición del objetivo se expone los motivos por los que se desarrolla el estudio, aplicación prevista, destinatario a quién se va a comunicar los resultados del ACV y el uso que se pretende dar a los resultados [17].

Etapa 2. Análisis de Inventario de Ciclo de Vida. El análisis de inventario comprende la obtención de datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas (materias primas, incluidas las fuentes de energía) y salidas relevantes (emisiones al aire, suelo y aguas y generación de residuos) del sistema asociadas a un producto o servicio, fundamentalmente es un balance de materia y energía del sistema. Los flujos de materiales y energía deben ser flujos unitarios que deben ir o proceder de la naturaleza [18].

Etapa 3. Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida. En esta fase, utilizando los resultados del análisis de inventario, se evalúa el significado de los impactos ambientales potenciales generados por las entradas y salidas del sistema, asociando los datos de inventario con las categorías de impacto ambientales seleccionadas y con los indicadores de estas categorías.

Etapa 4. Interpretación de resultados. En esta etapa, mediante el análisis de los objetivos y alcance del estudio, se definen las principales conclusiones y recomendaciones del ACV que permitan la toma de decisiones. Los resultados deben verificarse y analizarse con respecto a su consistencia, integridad y sensibilidad de los factores de incertidumbre relevantes [19].

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

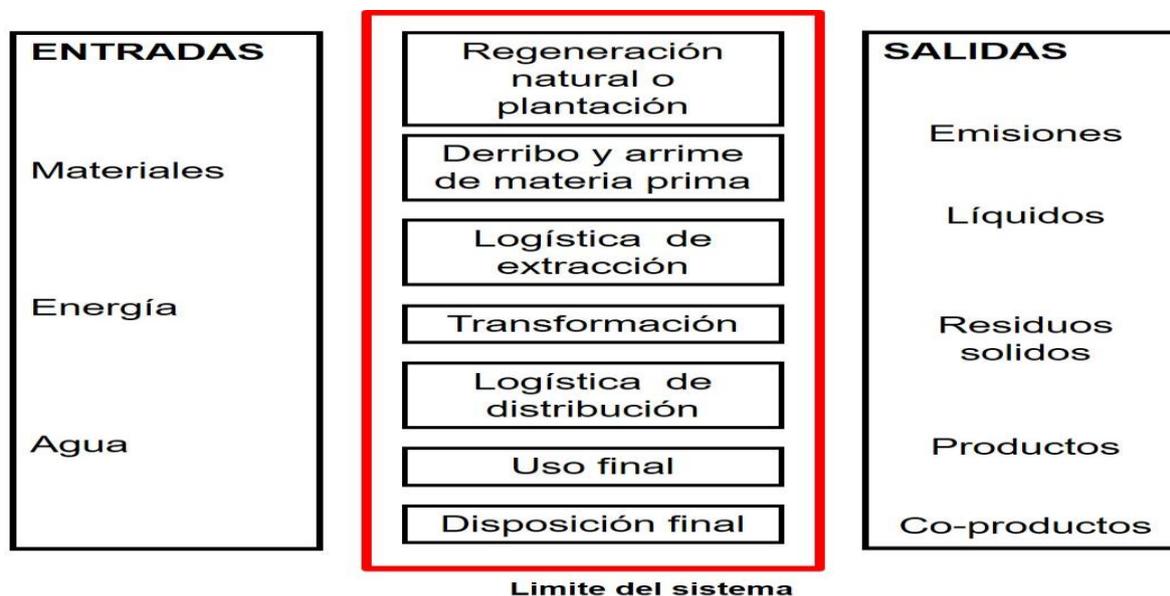
El ACV es el método estándar aceptado internacionalmente para evaluar los impactos ambientales de los productos de manera integral, incluidos los recursos consumidos y las emisiones liberadas. En el sector forestal, cubre la vida útil de un producto desde la extracción de materia prima hasta la etapa de eliminación o reciclaje del producto (Figura 1).

La aplicación metodológica de un ACV en el sector forestal de acuerdo a lo especificado en las normas [15], [17] and [20], se describe a continuación:

Etapa 1. Definición del objetivo y alcance del estudio.

Objetivo del estudio. La razón para realizar un estudio de ACV en el sector forestal es identificar soluciones de bajo consumo de energía y minimizar los impactos sobre el uso de energía y sobre el clima en los procesos de producción forestal.

Alcance del estudio. El sistema del producto representa el conjunto de procesos unitarios, que son considerados los elementos más pequeños para el análisis del inventario del ciclo de vida, del cual se cuantifican los datos de entrada y salida. Para el proceso de producción forestal, se proponen como procesos unitarios la extracción de la materia prima, el aserrío, secado de madera, fabricación de productos a base de mueble y la transportación.



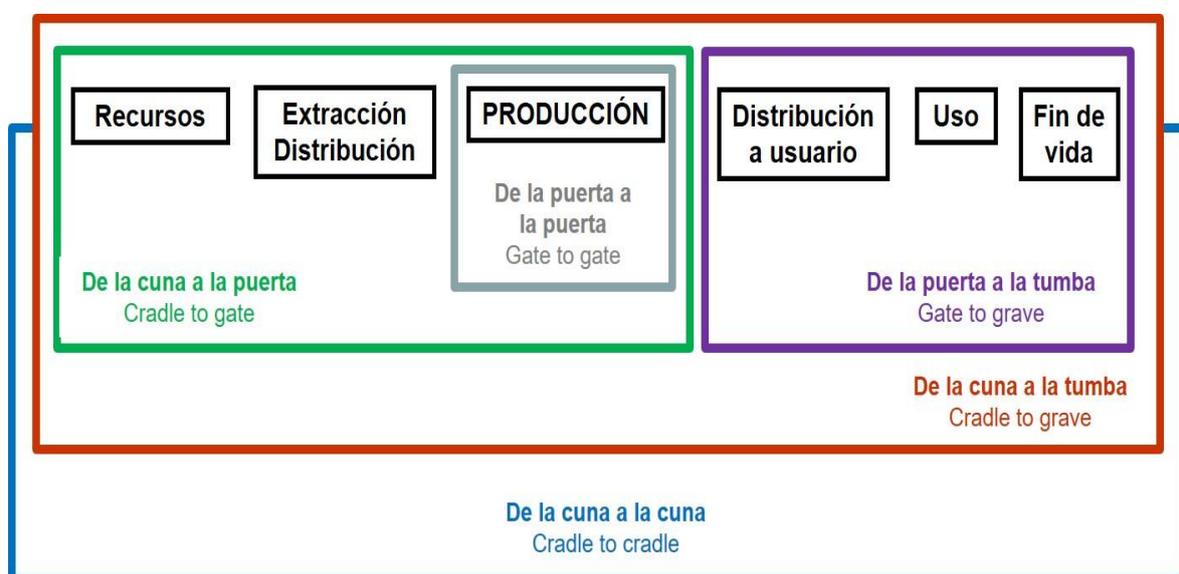
Fuente: [21].

Figura 1. Análisis del ciclo de vida del sector forestal, desde la regeneración del bosque hasta la eliminación de la madera.

Unidad funcional. La principal función del sistema forestal es la producción de madera, por lo tanto, la unidad funcional es un m³ de madera y dependiendo del proceso unitario puede ser de madera en rollo, madera aserrada o de madera procesada.

Límites del Sistema. El límite del estudio se debe considerar desde la regeneración del bosque hasta la disposición final de los residuos de la madera y del aserrío que son utilizados como leña, bajo un horizonte temporal o límite temporal de un año como mínimo, para evitar modificaciones que puedan surgir con el tiempo o dentro de los procesos productivos.

Para la realización de un Análisis del Ciclo de Vida de la producción forestal, la definición del límite del sistema debe enfocarse en etapas específicas, incluyendo o excluyendo algunas etapas del proceso, dependiendo del alcance que se desee o requiera en el estudio [22]. Dependiendo de los alcances del sistema en relación a las entradas/salidas de los procesos, el análisis del ciclo de vida se puede clasificar en (Fig. 2): **De la cuna a la tumba**, donde se incluyen todas las entradas/salidas de los procesos que participan a lo largo de su ciclo de vida, incluye la cadena de producción desde la extracción de la materia prima (cuna) y energía, el proceso de extracción de la materia prima, producción, transporte, su uso y finalmente el tratamiento de los residuos (tumba). **De la cuna a la cuna.** En este caso incluye todas las entradas/salidas de los procesos que participan a lo largo de su ciclo de vida y las salidas del “fin de vida” del sistema son valoradas como materias primas y/o entradas al mismo sistema o a otro. **De la cuna a la puerta**, cuando el alcance del sistema se limita a las entradas/salidas desde que se obtienen las materias primas hasta que el producto está listo para el mercado (a la salida de la planta de fabricación/montaje). **De la puerta a la tumba**, donde se incluyen los procesos desde el uso y las fases de la vida útil final de un producto, y **De la puerta a la puerta**, cuando solo se tiene en cuenta para la elaboración del ciclo de vida, las entradas/salidas del sistema productivo (procesos de fabricación).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2. Etapas de producción forestal y alcances de la aplicación de un análisis de ciclo de vida.

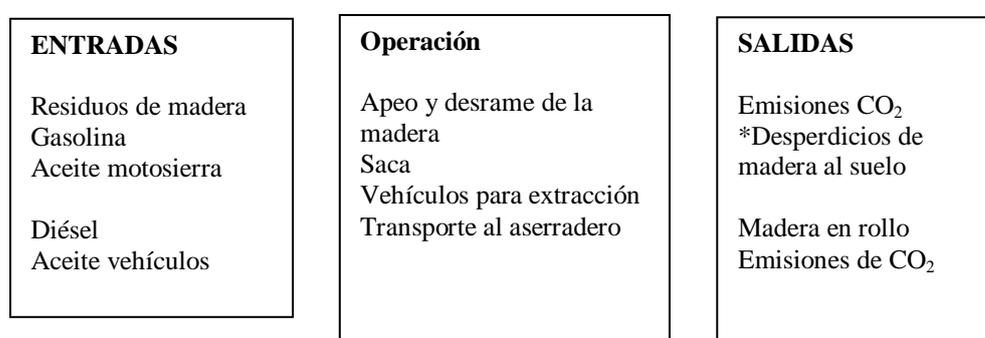
Requisitos de calidad de los datos. Como la calidad de los datos está en función de parámetros como procedencia geográfica, temporalidad, tecnología usada en el proceso, precisión y representatividad, fuente y representatividad de la fuente, consistencia y reproducibilidad de los métodos usados en el ACV, variabilidad e incertidumbre de la información y métodos [18], para la elaboración de estudios de ACV, los datos deben ser recopilados *in situ* de los procesos unitarios para que el estudio resulte lo más representativo posible, considerando aquellos cuya contribución a los flujos de masa y energía son importantes. Para los procesos en los cuales no se disponga de datos primarios se debe recurrir a fuentes de datos ya publicados, además, estos datos publicados se pueden utilizar para validar los datos primarios recogidos.

Etapa 2. Análisis de Inventario de Ciclo de Vida (ICV). El inventario del ciclo de vida (LCI) es un proceso basado en datos que cuantifica los requisitos de materia prima y energía, desechos sólidos, emisiones al aire, efluentes en el agua y otras emisiones ambientales que ocurren dentro de los límites predeterminados del sistema [11]. Para el caso del sector forestal, el flujo de referencia para medir las salidas se debe referir a kilogramos de CO₂ por unidad funcional, esto porque si se utiliza la unidad de volumen, este disminuye al avanzar la materia prima en los procesos unitarios, por lo tanto, debe tenerse en cuenta los coeficientes de transformación [23], [24], [25] and [26]. Además, al no existir datos del inventario de emisiones para el sector forestal mexicano, se deben usar factores de emisión de referencia(s) estándar para calcular las emisiones

seleccionadas en función de los volúmenes de producción de madera, para que así, la medición de las emisiones resultantes sean lo más locales posible.

En la figura 3, se detallan los flujos del proceso unitario corte y extracción de materia prima en un aprovechamiento forestal, que comprende las actividades necesarias desde el corte de la madera hasta su llegada al aserradero, esto es, el límite del sistema es de la cuna a la puerta (cradle to gate). Aun cuando el manejo forestal requiere mucha mano de obra, se considera que no genera carga ambiental. Se especifican tal cual exige la norma, la cantidad de las entradas, las unidades, la fuente y las salidas en productos, residuos y emisiones de CO₂ / Unidad funcional, que es la unidad de referencia del estudio.

En esta fase, utilizando los resultados del análisis de inventario, se evalúa el significado de los impactos ambientales potenciales generados por las entradas y salidas del sistema, asociando los datos de inventario con las categorías de impacto ambiental seleccionadas y con los indicadores de estas categorías (Cuadro 1). Algunas de las categorías de impacto más utilizadas para el sector forestal son: calentamiento global, agotamiento de la capa de ozono, formación de oxidantes fotoquímicos, acidificación, eutrofización, impacto de la radiación ionizante, smog potencial y pérdida de la biodiversidad, contempladas por la Sociedad de Toxicología y Química Ambiental (SETAC) [25] y [10].



*Los desperdicios se consideran ramas y ramillas equivalentes al 30% del volumen de madera que sale del monte. Son desperdicios beneficiosos como acondicionadores y/o fertilizantes del suelo.

Figura 3. Diagrama de flujos de entradas y salidas del proceso unitario corte y extracción de materia prima forestal, con límites del sistema de la cuna a la puerta (cradle to gate).

Cuadro 1. Categorías e indicadores de impacto más utilizados en ACV.

Categorías	Indicadores	Unidad de referencia
Para entradas	Materias primas	kg
	Recursos energéticos	MJ
	Uso del suelo	M ² /año o m ²
Para salidas	Calentamiento global	Kg CO ₂ eq
	Acidificación	Kg SO ₂ eq
	Formación de ozono troposférico	Kg C ₂ H ₂ eq
	Eutrofización	Kg PO ₄ ⁻³ eq.
	Ecotoxicidad	Kg DBC eq
	Toxicidad humana	Kg DBC eq
	Otros flujos de entrada y salida hacia y desde otros sistemas	Materiales para reciclaje o para valorización energética
	Residuos peligrosos y no peligrosos para eliminación final	Kg
	Uso de recursos reciclados	Kg
	Uso de recursos reutilizados	Kg

Fuente: [25].

Etapas 3. Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida. Para evaluar la relevancia de los distintos flujos energéticos y materiales, se procede a realizar el cálculo de los indicadores numéricos de cada categoría de impacto, esto mediante una conversión de los resultados del ICV a unidades comunes utilizando factores de caracterización que representan la cantidad de ese compuesto que, de ser emitido, tendría un efecto en el medio ambiente cuantitativamente comparable a la unidad base de la categoría de impacto. Posteriormente, se realiza la

conversión de los resultados obtenidos de la caracterización, dividiendo el valor de cada una de las categorías de impacto por un factor de normalización (Cuadro 2). Con estos factores se indica el grado de contribución de cada categoría de impacto sobre el problema medioambiental global.

Después de la normalización se obtiene un valor adimensional que representa la contribución del impacto, con respecto al valor global, en tanto por ciento. Para la evaluación del impacto se pueden encontrar numerosas metodologías, siendo las más empleadas en el ámbito internacional Ecoindicador 99 y CML, entre otras.

Cuadro 2. Factores de normalización para los países de la OCDE.

Categoría de impacto	Indicador de categoría	Factor
Acidificación	Kg SO ₂ eq.	1.31 x 10 ¹¹
Cambio climático	Kg CO ₂ eq.	2.04 x 10 ¹³
Eutrofización	Kg PO ₄ ⁻³ eq.	5.74 x 10 ¹⁰
Formación de oxidantes fotoquímicos	Kg C ₂ H ₄ eq.	2.61 x 10 ¹⁰
Agotamiento de recursos abióticos	Kg Sb eq.	6.91 x 10 ¹⁰
Toxicidad humana	Kg 1.4-DCB eq.	1.31 x 10 ¹³
Ecotoxicidad de agua dulce	Kg 1.4-DCB eq.	1,31 x 10 ¹²
Ecotoxicidad terrestre	Kg 1.4-DCB eq.	1,31 x 10 ¹¹

Fuente: [25].

Para facilitar la realización de un estudio de análisis de ciclo de vida durante las fases de inventario y evaluación de impactos producidos por un producto, se han creado herramientas de software (Cuadro 3), cuya característica es contener una o varias bases de datos y metodologías para la evaluación del impacto del ciclo de vida, con gran cantidad de información. A nivel mundial, los softwares más utilizados en el sector forestal son SimaPro y GaBi, ambos poseen información para hacer un estudio de ACV completo de diversos productos y procesos.

Etapa 4. Interpretación de resultados. En esta etapa, la interpretación se realiza mediante un análisis de contribución de las entradas y salidas en las etapas del ciclo de vida como un porcentaje del total, comparando la contribución que aporta cada elemento por proceso unitario. En el caso de la producción forestal, se enfatiza la contribución de emisiones de CO₂ por elemento y por proceso, determinado cual es el proceso unitario donde existe mayor emisión de CO₂.

Cuadro 3. Softwares para realizar estudios de ACV.

Software	Objetivo
SimaPro	Es una herramienta automatizada para proporcionar un ACV, recoge, analiza y supervisa la información ambiental de productos y servicios, por medio de las bases de datos integradas. https://simapro.com/
Biomitre	Software de uso fácil, se compone de tres componentes principales: especificaciones de diagramas de flujo que resumen las principales características de la tecnología, cálculo del balance de GEI y cálculo en el ahorro de costos, para establecer el ahorro neto de costos de una emisión determinada en base de Costo-Efectividad. https://www.joanneum.at/biomitre/softwaretool/
RET Screen	Evalúa la producción de energía y de ahorro, los costos, la reducción de emisiones, la viabilidad financiera y el riesgo de varios tipos de energías renovables y de eficiencia tecnológicas energética. http://www.nrcan.gc.ca/energy/softwaretools/7465
GEMIS	Ofrece los datos para el uso de energía, materiales y sistemas de transporte, incluidos en el análisis del ciclo de vida. Los datos ambientales abarcan las emisiones atmosféricas de gases de efecto invernadero, efluentes líquidos, residuos sólidos y uso de la tierra. https://ghgprotocol.org/Third-PartyDatabases/GEMIS
GaBi	Permite al usuario evaluar el material y los flujos de energía para los productos. Están considerados los datos y parámetros internos y el subsistema Umberto proporciona una visualización de todo el proceso desde la extracción de materias primas para la eliminación de residuos hasta el producto terminado. https://www.ifu.com/en/umberto/lcasoftware/
Eco-IT	Es una herramienta especializada en software simplificado de ACV y huella de carbono para productos. Este es especialmente indicado para diseñadores de productos y envases.

Air. ELCA	<p>http://www.admglobal.org/productionsupporttools/Ecodesign_Ecoit.html</p> <p>Permite incluir tanto ACV como huella de carbono. Se enfoca tanto en productos como para organizaciones. Es una potente interface gráfica para diseños de ciclo de vida y mapa de procesos.</p>
Open LCA	<p>https://www.solidforest.com/softwarehuella-ambiental.html</p> <p>Es un software gratuito, con una multiplataforma para realizar ACV completos. Está orientado al ACV, pero también se puede realizar la huella de carbono y del agua. Dispone de una amplia gama de base de datos. http://www.openlca.org/</p>
REET	<p>El modelo REET significa gases de efecto invernadero, emisiones reguladas y uso de energía en el transporte. Permite evaluar varias combinaciones entre motores y combustibles en una base consistente de ciclo de combustible. https://reet.es.anl.gov/</p>
GHG calculato rRSB	<p>Es la calculadora de ciclo de vida de la RSB, es una herramienta gratuita disponible para productores, procesadores y todos los demás agentes de la cadena de suministro. La calculadora permite ver fácilmente si cumple con la reducción mínima del 50% de los gases fósiles generados por los combustibles fósiles. https://rsb.org/services-products/ghgcalculator/</p>

Fuente: [27].

Como resultado de la aplicación de ACV en el sector forestal, según datos del COST Action E9 WG1, las emisiones de GEI en el proceso unitario de la cosecha, arrastre y transporte de troncos en varios países europeos osciló en promedio en 10 kgCO₂ eq/m³ de madera en rollo [28]. Sin embargo, según reportes de [29] los valores del indicador de impacto de calentamiento global para el proceso unitario de transporte y procesamiento de troncos son de 58.7 kg de CO₂ eq/m³ para la región noroeste de EE. UU. y de 81.4 kg de CO₂ eq/m³ para la región sureste. Por otro lado, de acuerdo con [30], la cosecha y el transporte de trozos producen la menor carga ambiental, mientras que las operaciones que requieren generación de calor producen la mayor carga. Por lo que, los impactos del manejo forestal representan del 1 al 13% de los impactos totales desde la cuna hasta la puerta para el potencial de calentamiento global [31].

Para el caso del sector forestal mexicano, solo existe un estudio de ACV realizado por [32] en la empresa forestal de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, donde identificó que la mayor contribución de impacto ambiental de los procesos de aserrío y secado, se presenta en la categoría de impacto de calentamiento global, con un potencial de 18.32 kg CO₂eq en el proceso unitario de aserrío y de 45.91 kgCO₂eq para el proceso unitario de secado de madera. Estos resultados corresponden a un análisis con límite del sistema de “puerta a puerta” y sus valores son específicos para esta empresa y con la tecnología en uso en ese momento, esto es, fue la contribución del impacto ambiental de los procesos de transformación de la madera por la empresa. A partir de los resultados anteriores, la empresa debería mejorar sus procesos para que su impacto ambiental sea menor.

IV. CONCLUSIONES

Actualmente, en el sector forestal existe un gran desconocimiento de los alcances de un ACV, lo cual se ve reflejado en la cantidad de trabajos realizados en el tema. Un problema fundamental para aplicar con éxito un ACV en sector, es la falta de datos de alta calidad que contengan todas las entradas y salidas de los diferentes materiales utilizados, el consumo de energía y la cantidad de contaminantes y emisiones producidas, en las diferentes etapas del proceso productivo.

Mediante la aplicación de un ACV, se puede demostrar que los productos a base de madera tienen perfiles ambientales favorables en comparación con otros materiales que compiten con la madera en los diferentes usos finales.

En el desarrollo de ACV en el sector forestal, las comparaciones entre estudios de caso son difíciles debido a las influencias regionales en los procesos de fabricación, la diversidad de coproductos que se obtienen y las distancias para el transporte, así como a la dificultad para utilizar una sola unidad funcional, donde debe tenerse en cuenta los coeficientes de transformación que difieren tanto por el equipo usado como la eficiencia de transformación, por lo tanto, solo se identifican tendencias generales para la mejora ambiental de la producción forestal.

REFERENCES

- [1]. Gava O., F. Bartolini, F. Venturi, G. Brunori, A. Zinnai and A. Pardossi. 2019. A reflection of the use of the life cycle assessment tool for agri-food sustainability. Sustainability 11, 71; doi:10.3390/su11010071.
- [2]. Fausi R. T., P. Lavoie, L. Sorelli, M. D. Heidari and B. Amor. 2019. Exploring the current challenges and opportunities of life cycle sustainability assessment. Sustainability 11, 636; DOI:10.3390/su11030636. 17 p.
- [3]. Heinimann, H. R. 2012. Life Cycle Assessment (LCA) in forestry – State and perspectives. Croatian Journal of Forest Engineering 33(2):357-372

- [4]. Myllyviita, T. 2013. Sustainability assessment of forest resources – tools for a problem-orientated approach. *Dissertationes Forestales* 168. 38 p. Available at <http://dx.doi.org/10.14214/df.168>
- [5]. Murphy R. J. 2004. Review of information on life cycle analysis of tropical timber products. Pre-project report PPD 48/02 (M). ITTO.
- [6]. Onat N. C., M. Kucukvar, A. Halog and S. Cloutier. 2017. Review systems thinking for life cycle sustainability assessment: a review of recent developments, applications, and future perspectives. *Sustainability* 9, 706; DOI:10.3390/su9050706
- [7]. Sathre, R. and S. González-García. 2014. Life cycle assessment (LCA) of wood-based building materials. DOI:10.1533/9780857097729.2.311
- [8]. Adhikari, S. and B. Ozarska. 2018. Minimizing environmental impacts of timber products through the production process “From Sawmill to Final Products”. *Environmental systems research* 7:6 <https://doi.org/10.1186/s40068-018-0109>
- [9]. Buchanan, A. and B. Honey. 1994. Energy and carbon dioxide implications of building construction. *Energy and Buildings* 20:205-217.
- [10]. Regino M. P., J. Regino M. y C. Riba i R. 2011. Life Cycle Assessment and its relevance for community forest enterprises of Oaxaca, Mexico. *In: Memorias EcodAI México 2018 3er Congreso Latinoamericano de Ecodiseño*. Puebla, México.
- [11]. Yildirim, N. 2018. Life cycle assessment (LCA) of nanocellulose composite panels (NCPs) manufactured using freeze-drying technique. *Turkish Journal of Forestry Research* 5(1):56-63.
- [12]. Chacón, J. R. 2008. Historia ampliada y comentada del análisis de ciclo de vida (ACV) con una bibliografía selecta. *Revista de La Escuela Colombiana de Ingeniería* 18(72):37–70.
- [13]. Güereca, L.P., Sosa, R.O., Gilbert, H.E., y Reynaga, N.S. 2015. Life cycle assessment in Mexico: overview of development and implementation. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 20, 311–317.
- [14]. Guzmán M. L., A. Moreno S., M. S. Castellanos V., W. Contreras M., S. Capuz R. y J. L. Vivancos B. 2009. Análisis de ciclo de vida en la fábrica de muebles La Cibeles, Jalisco, México, en procura de la ecoeficiencia de procesos y productos industriales. *Ecodiseño & Sostenibilidad* 1(1): 87-106.
- [15]. International Organization for Standardization(ISO). 2006a. ISO 14040. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. Geneva, Switzerland.
- [16]. International Organization for Standardization(ISO). 2006b. ISO 14044. Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. Geneva, Switzerland.
- [17]. Borrión, A.L., McManus, M.C., and Hammond, G.P. 2012. Environmental life cycle assessment of lignocellulosic conversion to ethanol: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 4638–4650.
- [18]. Cloquell B. V. A., W. Contreras M., M. Owen y J. L. Vivancos B. 2006. Evaluación del nivel de sostenibilidad de la madera y los productos forestales. Método Análisis de Ciclo de Vida ACV-COCLOWEN. Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Valencia, España. 127 p.
- [19]. Gnansounou, E. 2017. Fundamentals of Life Cycle Assessment and Specificity of Biorefineries. In *Life-Cycle Assessment of Biorefineries*, Elsevier, pp. 41–75.
- [20]. DOF. 2009. Declaratoria de vigencia de las normas mexicanas NMX-SAA-14025-IMNC-2008, NMX-SAA-14040-IMNC-2008, NMX-SAA-14044-IMNC-2008 y NMX-SAA-14065-IMNC-2008. México, D. F.
- [21]. Sahoo, K., R. Bergman, S. A. Rosenbaum, H. Gu and S. Liang. 2019. Life cycle assessment of forest-based products: a review. *Sustainability* 11, 4722; DOI:10.3390/su11174722. 30 P.
- [22]. Fokaides, P.A. and Christoforou E. 2016. Handbook of Biofuels Production. Chapter3, Life cycle sustainability assessment of biofuels. pp: 41-60.
- [23]. Jungmeier G., F. Werner, A. Jarnehammar, C. Hohenthal and K. Richter. 2002a. Allocation in LCA of wood-based products, Experiences of Cost Action E9. Part I. Methodology. *Int J LCA* 7(5):290–294.
- [24]. Jungmeier G., F. Werner, A. Jarnehammar, C. Hohenthal and K. Richter. 2002b. Allocation in LCA of wood-based products, Experiences of Cost Action E9. Part II. Examples. *Int J LCA* 7(6):369-375.
- [25]. Ihobe. 2009. Análisis de ciclo de vida y huella de carbono. Dos maneras de medir el impacto ambiental de un producto. Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial, Agricultura y Pesca Gobierno Vasco. Bilbao, España. 36 p.
- [26]. Cerrón R., M. L. 2010. El ciclo de vida de la madera aserrada de Eucalyptus globulus Labill - Valle del Mantaro. Tesis licenciatura. Universidad Nacional del centro del Perú. Huancayo, Perú.
- [27]. Aguilar S. P., J. Quintanar O. y A. X. Ibarra G. 2018. Importancia de análisis de ciclo de vida y eficiencia energética en procesos agroindustriales. *Revista del desarrollo urbano y sustentable* 4(13):27-34.
- [28]. Karjalainen, T., Zimmer, B., Berg, S., Welling, J., Schwaiger, H., Finér, L. and Cortijo, P. 2001. Energy, carbon and other material flows in the life cycle assessment of forestry and forest products: Achievements of the Working Group 1 of the COST Action E9. European Forest Institute, Discussion Paper 10, European Forest Institute, Joensuu, Finland.
- [29]. Milota, M. and M. E. Puettmann. 2017. Life-cycle assessment for the cradle-to-gate production of softwood lumber in the Pacific Northwest and Southeast regions. *Forest Products Journal* 67(5-6):331-342.
- [30]. Puettmann, M. E. and J. B. Wilson. 2005. Life-cycle analysis of wood products: cradle-to-gate LCI of residential wood building materials. *Wood and Fiber Science* 37(Special Issue):18–29.
- [31]. Oneil E. and M. E. Puettmann. 2017. A life-cycle assessment of forest resources of the Pacific Northwest, USA. *Forest Products Journal* 67(5-6):316-330.
- [32]. Regino M., P. 2015. Las empresas forestales comunitarias y la innovación sustentable. Evaluación mediante el análisis de ciclo de vida en los procesos de producción del sector de la madera y mueble en Oaxaca, México. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, España.