

Carbon footprint estimate in the primary wood processing industry in El Salto, Durango

Estimación de la huella de carbono en la industria de transformación primaria de la madera en El Salto, Durango

Pedro Meza-López*; Mayra K. Trujillo-Delgado; Alan U. Burciaga-Álvarez; Ricardo de la Cruz-Carrera; Juan A. Nájera-Luna

Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de El Salto (TNM-ITES), Programa de Ingeniería Forestal. Mesa del Tecnológico s/n, El Salto. C. P. 34942. Pueblo Nuevo, Durango, México.

*Corresponding author: pettermezza@itelsalto.edu.mx; tel.: +52 618 370 9837.

Abstract

Introduction: The primary wood processing industry releases greenhouse gases (GHGs); their mitigation involves measuring the carbon footprint.

Objective: To estimate the carbon footprint of two forestry companies dedicated to the primary transformation of wood.

Materials and methods: Companies established as organizational boundaries L1 and L2 have two (Q1 and Q2) and one (D) sawmill, respectively. The operational limits were A1 (direct emissions from fossil fuel consumption), A2 (indirect emissions from electricity consumption) and A3 (emission sources not owned by L1 and L2). GHG emissions were calculated in two annuities with the method of using documented activity data and emission factors level 1. The annuities were compared with the Student' *t*-test and Wilcoxon test, and the sawmills with the Kruskal-Wallis test.

Results and discussion: The estimated carbon footprint for L1 was 480.06 tCO₂e·year⁻¹, where A1, A2 and A3 represented 29.32 %, 14.59 % and 56.09 %, respectively. L2 had a footprint of 230.56 tCO₂e·year⁻¹ of which 9.39 %, 11.78 % and 78.83 % corresponded to the categories A1, A2 and A3, respectively. The cumulative uncertainty was within a fair range of accuracy (±25 %). Only the direct GHG emissions between L1 annuities were statistically different (*P* < 0.05). Mechanical technology made the difference in GHG emissions among sawmills (*P* < 0.05).

Conclusions: The carbon footprint is inherent to the energy used; energy management ensures the mitigation of GHG emissions.

Resumen

Introducción: La industria de la transformación primaria de la madera libera gases de efecto invernadero (GEI); su mitigación implica medir la huella de carbono.

Objetivo: Estimar la huella de carbono de dos empresas forestales dedicadas a la transformación primaria de la madera.

Materiales y métodos: Las empresas establecidas como los límites organizacionales L1 y L2 poseen dos (Q1 y Q2) y un (D) aserradero, respectivamente. Los límites operacionales fueron A1 (emisiones directas por consumo de combustibles fósiles), A2 (emisiones indirectas por consumo de energía eléctrica) y A3 (fuentes de emisión que no son propiedad de L1 y L2). Las emisiones de GEI se calcularon en dos anualidades mediante el método uso de datos de actividad y factores de emisión documentados nivel 1. Las anualidades se compararon con la prueba *t* de Student y Wilcoxon, y los aserraderos con la prueba Kruskal-Wallis.

Resultados y discusión: La huella de carbono estimada en L1 fue 480.06 tCO₂e·año⁻¹, donde A1, A2 y A3 representaron 29.32 %, 14.59 % y 56.09 %, respectivamente. En L2, la huella fue 230.56 tCO₂e·año⁻¹ de la cual 9.39 %, 11.78 % y 78.83 % correspondieron a las categorías A1, A2 y A3, respectivamente. La incertidumbre acumulada se ubicó en un rango de precisión justo (±25 %). Solo las emisiones directas de GEI entre anualidades de L1 fueron estadísticamente diferentes (*P* < 0.05). La tecnología mecánica marcó la diferencia de emisión de gases de efecto invernadero entre aserraderos (*P* < 0.05).

Conclusiones: La huella de carbono es inherente a la energía utilizada; la administración de la energía garantiza la mitigación de emisiones de GEI.

Keywords: sawmill; greenhouse gases; mobile combustion; electrical energy; mechanical technology.

Palabras clave: aserradero; gases de efecto invernadero; combustión móvil; energía eléctrica; tecnología mecánica.

Introduction

The primary wood processing industry consists of a sequence of interrelated operations to convert roundwood into sawn timber. This conversion releases greenhouse gases (GHG) into the atmosphere that contribute to significant environmental loads and impacts (Ramasamy, Ratnasingam, Bakar, Halis, & Muttiah, 2015). The release of GHGs comes from manufacturing facilities (typically, scope 1 emissions) and from electricity producers that supply manufacturers (scope 2 emissions) (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2010). Most GHGs emitted by wood products manufacturing facilities result from the burning of fossil fuels and the consumption of purchased electricity (Miner & Pérez-García, 2007).

The need to accelerate efforts to reduce anthropogenic GHG emissions is increasingly urgent (World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development [WRI & WBCSD], 2011). One indicator that has been useful in assessing the potential for GHG mitigation is the carbon footprint; therefore, it needs to be measured and reported as an element in the decision-making processes of individuals, companies, regions or countries (Schneider & Samaniego, 2009).

The carbon footprint is a measure of the total amount of carbon dioxide directly and indirectly emitted because of an activity or that is accumulated in the life stages of a product (Wiedmann & Minx, 2008). This includes activities of individuals, populations, governments, companies, organizations, processes, and industry sectors. In any case, all direct (on-site or internal) and indirect (off-site, external, upstream, and downstream) emissions should be considered (Galli et al., 2012). The carbon footprint is expressed in tons of carbon dioxide equivalent (tCO_2e), which covers emissions of carbon dioxide (CO_2), methane (CH_4) and nitrous oxide (N_2O) (Goodier, 2011; Muthu, 2016).

The popularity of sustainability practices in business is evidenced by the development of standards for GHG measurement, such as the Corporate Accounting and Reporting Standard of the GHG Protocol, and the ISO 14001. Thanks to these, companies have developed technical capabilities for estimating emissions and preparing corporate GHG emission inventories (Jiménez, 2010; Siew, 2015). Measuring the carbon footprint of a product or a company's GHG inventory involves performing an emissions accounting exercise (Frohmann, Mulder, Olmos, & Herreros, 2012). The most common methodological approach is to combine information about the scope of an activity (called activity data) with coefficients that quantify

Introducción

La industria de la transformación primaria de la madera consta de una secuencia de operaciones interrelacionadas para convertir madera en rollo a madera aserrada. Esta conversión libera gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera que contribuyen a cargas e impactos ambientales importantes (Ramasamy, Ratnasingam, Bakar, Halis, & Muttiah, 2015). La liberación de GEI proviene de las instalaciones de fabricación (generalmente, emisiones de alcance 1) y de los productores de electricidad que abastecen a los fabricantes (emisiones de alcance 2) (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2010). La mayor parte de los GEI, emitidos por las instalaciones de fabricación de productos de madera, son resultado de la quema de combustibles fósiles y el consumo de energía eléctrica comprada (Miner & Pérez-García, 2007).

La necesidad de acelerar los esfuerzos para reducir las emisiones antropogénicas de los GEI es cada vez más urgente (World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development [WRI & WBCSD], 2011). Un indicador que ha sido útil para investigar las posibilidades de mitigación de las emisiones de GEI es la huella de carbono; por consiguiente, es necesario medirla y divulgarla como un elemento más en los procesos de toma de decisiones de los individuos, empresas, regiones o países (Schneider & Samaniego, 2009).

La huella de carbono es una medida de la cantidad total de dióxido de carbono, directa e indirectamente emitida a causa de una actividad o que es acumulada en las etapas de vida de un producto (Wiedmann & Minx, 2008). Esto incluye actividades de individuos, poblaciones, gobiernos, empresas, organizaciones, procesos y sectores industriales. En cualquier caso, todas las emisiones directas (en el sitio o internas) e indirectas (fuera del sitio, externas, corriente arriba y corriente abajo) deben tomarse en cuenta (Galli et al., 2012). La huella de carbono es expresada en toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO_2e), que abarca las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) (Goodier, 2011; Muthu, 2016).

La popularidad de prácticas de sustentabilidad en las empresas se evidencia por el desarrollo de estándares para la medición de GEI, tales como el Estándar Corporativo de Contabilidad y Reporte del Protocolo de GEI, y la norma ISO 14001. Gracias a estas, las empresas han desarrollado capacidades técnicas para la estimación de las emisiones y elaboración de los inventarios corporativos de emisiones de GEI (Jiménez, 2010; Siew, 2015). La medición de la huella de carbono de un producto o un inventario de GEI de una

emissions or uptake per unit activity (called emission factors) (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2006).

On the other hand, as environmental awareness increases, consumer habits change; therefore, the promotion of wood products as effective carbon sinks opens new opportunities for the forest industry (Adhikari & Ozarska, 2018; Reid et al., 2004). Measuring and reducing GHG emissions in the forest industry can, in turn, bring benefits in terms of toxic limitations, health improvements, economic savings from energy efficiency, introduction of new processes, promotion of renewable energy sources, and opportunities to participate in carbon markets (WBCSD & WRI, 2005).

In Mexico, studies on the amount of GHG emissions from the primary wood processing industry are highly limited. This industry requires knowledge of its carbon footprint to take a path towards reducing or mitigating GHG emissions. In this sense, this study made an inventory of GHG emissions from two forestry companies, according to the methodology proposed by the GHG Protocol of the WBCSD and WRI (2005). This includes choosing a consolidation approach to set the organizational boundaries; identifying the operational understanding boundaries; calculating GHG emissions with the method using activity data and documented emission factors; and evaluating the cumulative uncertainty. Based on the above, this research aimed to estimate the carbon footprint of two forestry companies and compare GHG emissions from the most representative source categories associated with the process operations.

Materials and methods

Study area and GHG inventory limits

The study was carried out in the region of El Salto, municipality of Pueblo Nuevo, Durango, in the companies *Aserradero y fábrica de cajas Quintana*, and *Sociedad de producción forestal El Diamante*. The establishment of organizational boundaries is shown in Table 1. The organizational boundaries (L1 and L2) are the forestry companies dedicated to the primary transformation of wood into large dimensions, specially *Pinus* spp. wood. Approximately 1 400 and 800 m³·month⁻¹ of roundwood are processed for L1 and L2, respectively. The emission consolidation approach taken was operational control, as the legal structure alluded to L1 and L2 as absolute owners of the operations carried out on the site. L1 has two sawmills (Q1 and Q2) with average daily production of 8 001 board foot (bf·day⁻¹) per sawmill, while L2 has only one sawmill (D), with a production level of 8 285 pt·day⁻¹.

empresa implica realizar un ejercicio de contabilidad de emisiones (Frohmann, Mulder, Olmos, & Herreros, 2012). El abordaje metodológico más frecuente consiste en combinar la información sobre el alcance hasta el cual tiene lugar una actividad (denominado datos de actividad) con los coeficientes que cuantifican las emisiones o absorciones por actividad unitaria (denominados factores de emisión) (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2006).

Por otra parte, a medida que la conciencia sobre el medio ambiente aumenta, los hábitos de consumo cambian; por lo tanto, la promoción de productos de madera como depósitos eficaces de carbono abre nuevas oportunidades para la industria forestal (Adhikari & Ozarska, 2018; Reid et al., 2004). La medición y reducción de emisiones de GEI en la industria forestal puede, a su vez, lograr beneficios en cuanto a limitaciones tóxicas, mejoras a la salud, ahorros económicos por eficiencia energética, introducción de nuevos procesos, promoción de fuentes renovables de energía y oportunidades para participar en mercados de carbono (WBCSD & WRI, 2005).

En México, los estudios sobre la cantidad de emisiones de GEI provenientes de la industria de transformación primaria de la madera son muy limitados. Esta industria requiere conocer su huella de carbono para emprender una ruta hacia la reducción o mitigación de emisiones de GEI. En este sentido, en el presente estudio se hizo un inventario de emisiones de GEI de dos empresas forestales, de acuerdo con la metodología propuesta por el protocolo de GEI del WBCSD y WRI (2005). Esta incluye: elegir un enfoque de consolidación para establecer los límites organizacionales; identificar los límites de entendimiento operacional; calcular las emisiones de GEI empleando el método uso de datos de actividad y factores de emisión documentados; y evaluar la incertidumbre acumulada. Con base en lo anterior, esta investigación tuvo como objetivo estimar la huella de carbono de dos empresas forestales y comparar las emisiones de GEI provenientes de las categorías de fuente más representativas, asociadas a las operaciones de proceso.

Materiales y métodos

Área de estudio y límites del inventario de GEI

El estudio se llevó a cabo en la región de El Salto, municipio de Pueblo Nuevo, Durango, en las empresas *Aserradero y fábrica de cajas Quintana*, y *Sociedad de producción forestal El Diamante*. El establecimiento de los límites organizacionales se muestra en el Cuadro 1. Los límites organizacionales (L1 y L2) son las empresas forestales dedicadas a la transformación primaria de la madera en largas dimensiones, particularmente

Table 1. Organizational boundaries of two forestry companies dedicated to the primary transformation of wood in the region of El Salto, Durango.

Cuadro 1. Límites organizacionales de dos empresas forestales dedicadas a la transformación primaria de la madera en la región de El Salto, Durango.

Organizational boundaries/ Límite organizacional	Site area (ha)/ Superficie del sitio (ha)	Legal structure/ Estructura legal	Consolidation approach/ Enfoque de consolidación		Sawmills/ Aserraderos
			Operational control (%)/ Control operacional (%)	Shareholding (%)/ Participación accionaria (%)	
Aserradero y fábrica de cajas Quintana (L1)	2.21	Sole proprietor/ Único dueño	100	0	Quintana 1 (Q1) Quintana 2 (Q2)
Sociedad de producción forestal El Diamante (L2)	1.50	26 partners/ 26 socios	100	0	Diamante (D)

The defined operational limits and evaluated source categories are shown in Figure 1. Scope 1 (A1) refers to direct GHG emissions from fossil fuel consumption at mobile sources owned by L1 and L2. Similarly, scope 2 (A2) integrates indirect emissions from the consumption of purchased electricity in operations controlled by L1 and L2. In contrast, scope 3 (A3) includes operations or emission sources that are not owned or controlled by L1 and L2. The upstream operations were excluded from the GHG emissions inventory. The disaggregation of data per source category, emission source and annual time sequence ensured that scopes A1, A2 and A3 were mutually exclusive, avoiding double counting of GHG emissions.

Census and sampling

The activity data census consisted of concentrating the key documents consistent with the amount of energy consumed into A1 and A2 during the time series 2017-2018 (S17-S18), which include invoices, receipts and financial reports from operations owned and controlled by L1 and L2. Activity data for the category A3 was collected through 11 interviews with truck operators (fuel-based method). The interview content included information on the frequency and quantity of fossil fuel discharged monthly.

Sampling was done at the most representative emission sources corresponding to A1 and A2 during the workday, and which are closely linked to the processing operations of the sawmills Q1, Q2 and D. Fossil fuel consumption in mobile sources of round wood and sawn lumber management operations is derived from one forklift per sawmill. The difference in fuel volume between each discharge (l) and effective time of use (h) was recorded to determine the amount of fossil fuel consumed. Likewise, electric energy

madera del género *Pinus* spp. En L1 y L2 se procesan aproximadamente 1 400 y 800 m³.mes⁻¹ de madera en rollo, respectivamente. El enfoque de consolidación de emisiones elegido fue control operacional, dado que la estructura legal aludió que L1 y L2 son propietarias absolutas de las operaciones que se realizan en el sitio. En L1 existen dos aserraderos (Q1 y Q2) con producción promedio diaria de 8 001 pie-tabla (pt·d⁻¹) por aserradero, mientras que en L2 se encuentra instalado solo un aserradero (D), con un nivel de producción de 8 285 pt·d⁻¹.

Los límites operacionales definidos y las categorías de fuente evaluadas se muestran en la Figura 1. El alcance 1 (A1) se refiere a las emisiones directas de GEI a causa del consumo de combustibles fósiles en fuentes móviles que son propiedad de L1 y L2. De igual manera, el alcance 2 (A2) integra las emisiones indirectas derivadas del consumo de energía eléctrica comprada en operaciones que son controladas por L1 y L2. En cambio, el alcance 3 (A3) incluye las operaciones o fuentes de emisión que no son propiedad ni están controladas por L1 y L2. Las operaciones corriente arriba se excluyeron del inventario de emisiones de GEI. La desagregación de datos por categoría de fuente, fuente de emisión y secuencia temporal anual garantizó que los alcances A1, A2 y A3 fueran mutuamente excluyentes, evitando una doble contabilidad de emisiones de GEI.

Censo y muestreo

El censo de datos de actividad consistió en la concentración de los documentos clave coherentes con la cantidad de energía consumida en A1 y A2 durante la serie temporal 2017-2018 (S17-S18), los cuales incluyen facturas, recibos e informes financieros de las operaciones que son propiedad y están controladas por L1 y L2. Los datos de actividad de la categoría A3

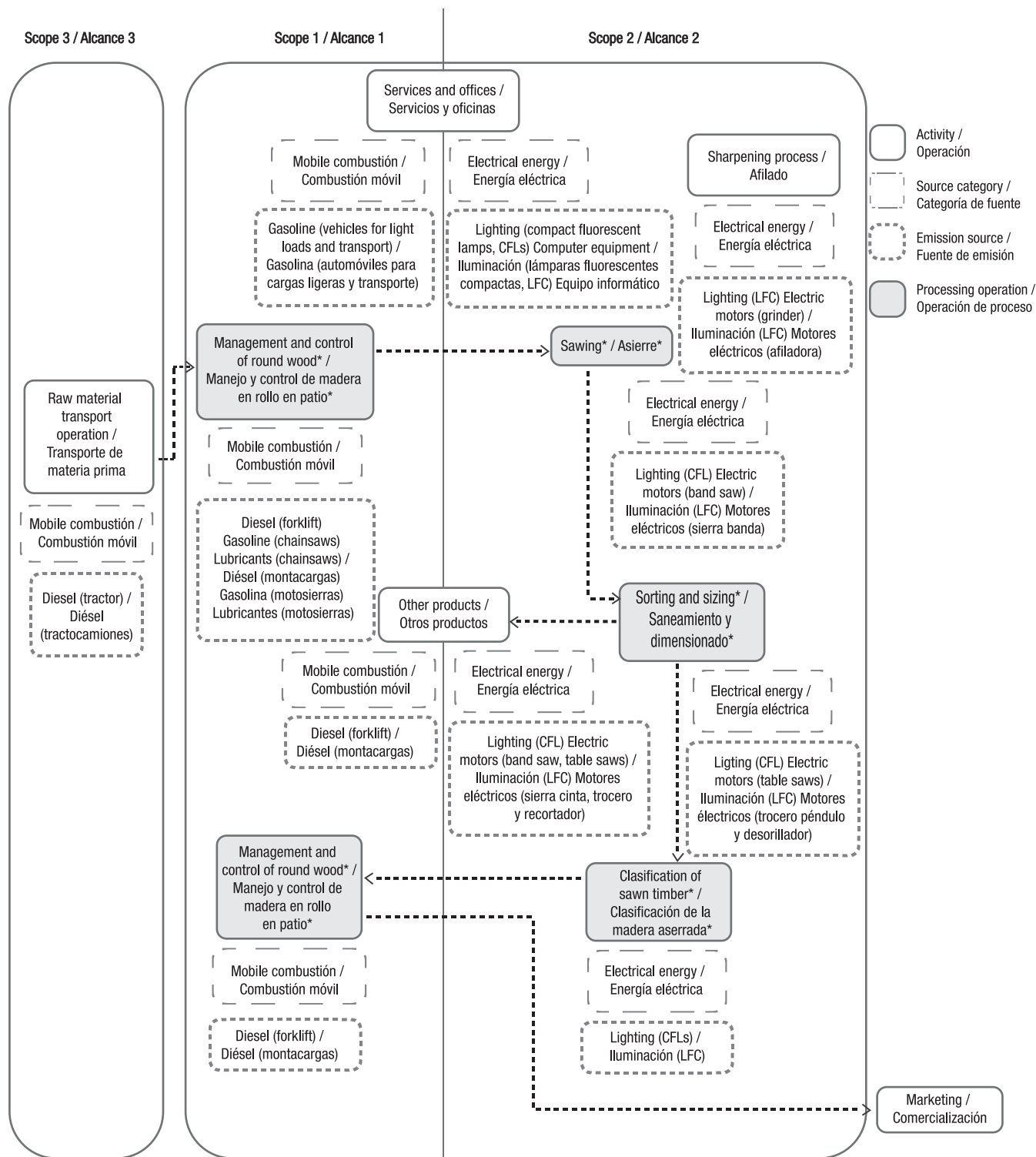


Figure 1. Operational limits of two forestry companies dedicated to the primary transformation of wood in the region of El Salto, Durango. *Identity of sawmill operations based on the Rainforest Alliance proposal (2010). Source: Compiled by the authors.

Figura 1. Límites operacionales de dos empresas forestales dedicadas a la transformación primaria de la madera en la región de El Salto, Durango. *Identidad de las operaciones en aserraderos basada en la propuesta de Rainforest Alliance (2010). Fuente: Elaboración propia.

consumption was associated with the electric motors of the machinery used in sawing, sanitation, and sizing operations. Therefore, in order to know the electric energy consumption, it was necessary to measure the active power (kW) in intervals of demand of 15 min, using the Mastech MS2203® power meter connected to the main node of the electric circuit of each sawmill.

GHG emissions were estimated using the method of applying documented emission factors level 1 (IPCC, 2006; WBCSD & WRI, 2005). The level 1 method calculates emissions by multiplying fuel or electrical energy consumed with a respective emission factor. The equations used were as follows:

$$E_n^{CO_2} = \sum_a^n C_a \cdot FE_a^{CO_2}$$

$$E_n^{CH_4} = \sum_a^n C_a \cdot FE_a^{CH_4}$$

$$E_n^{N_2O} = \sum_a^n C_a \cdot FE_a^{N_2O}$$

$$E_n^{CO_2e} = \left[(E_n^{CO_2}) (E_n^{CH_4} \cdot PCH_{CH_4}) (E_n^{N_2O} \cdot PCH_{NO_2}) \right]$$

$$E_{electric\ energy}^{CO_2e} = C_{electric\ energy} \cdot FE_{electric\ energy}$$

where,

$E_n^{CO_2}$ = carbon dioxide emissions from mobile combustion (kg)

$E_n^{CH_4}$ = methane emissions from mobile combustion (kg)

$E_n^{N_2O}$ = nitrous oxide emissions from mobile combustion (kg)

a = type of fossil fuel (diesel, gasoline, and lubricants)

n = total number of fossil fuels

C_a = amount of fossil fuel consumed (TJ)

FE_a = default emission factor for carbon dioxide, methane, and nitrous oxide (kg·TJ⁻¹)

$E_n^{CO_2e}$ = total emissions from n fossil fuels (tCO₂e)

PCG = global warming potential of carbon dioxide, methane and nitrous oxide

$E_{electric\ energy}^{CO_2e}$ = emissions from electrical energy (tCO₂e)

$C_{electric\ energy}$ = amount of electrical energy consumed (MWh)

$FE_{electric\ energy}$ = emission factor of the national electrical system (tCO₂e·MWh⁻¹)

Default emission factors, published by the IPCC (2006), were selected to determine the amount of emissions from the mobile combustion category; global warming potentials were taken from the IPCC's fifth assessment report (AR5) (2015). Also, the emission factors of the national electrical system, disclosed by the *Comisión Reguladora de Energía* (CRE, 2017, 2019), were used to calculate the emissions associated with the electrical energy category.

se acopiaron mediante 11 entrevistas dirigidas a los operadores de los tractocamiones (método basado en combustible). El contenido de la entrevista incluyó información sobre la frecuencia y cantidad de combustible fósil vertido mensualmente.

El muestreo se hizo en las fuentes de emisión más representativas correspondientes a A1 y A2 durante la jornada de trabajo, y que tienen vinculación estrecha con las operaciones de proceso de los aserraderos Q1, Q2 y D. El consumo de combustibles fósiles en fuentes móviles de operaciones de manejo de madera en rollo y aserrada en patio deriva de un montacargas por aserradero. La diferencia de volumen de combustible entre cada vertimiento (l) y el tiempo efectivo de uso (h) se registraron para determinar la cantidad de combustible fósil consumido. Asimismo, el consumo de energía eléctrica se asoció a los motores eléctricos de la maquinaria empleada en operaciones de asierre, saneamiento y dimensionado. Por tanto, para conocer el consumo de energía eléctrica fue necesaria la medición de la potencia activa (kW) en intervalos de demanda de 15 min, utilizando el medidor de potencia Mastech MS2203® conectado al nodo principal del circuito eléctrico de cada aserradero.

Las emisiones de GEI se estimaron con el método aplicación de factores de emisión documentados nivel 1 (IPCC, 2006; WBCSD & WRI, 2005). El método de nivel 1 calcula las emisiones, multiplicando el combustible o la energía eléctrica consumida con un factor de emisión respectivo. Las ecuaciones empleadas fueron las siguientes:

$$E_n^{CO_2} = \sum_a^n C_a \cdot FE_a^{CO_2}$$

$$E_n^{CH_4} = \sum_a^n C_a \cdot FE_a^{CH_4}$$

$$E_n^{N_2O} = \sum_a^n C_a \cdot FE_a^{N_2O}$$

$$E_n^{CO_2e} = \left[(E_n^{CO_2}) (E_n^{CH_4} \cdot PCH_{CH_4}) (E_n^{N_2O} \cdot PCH_{NO_2}) \right]$$

$$E_{energía\ eléctrica}^{CO_2e} = C_{energía\ eléctrica} \cdot FE_{energía\ eléctrica}$$

donde,

$E_n^{CO_2}$ = emisiones de dióxido de carbono derivadas de la combustión móvil (kg)

$E_n^{CH_4}$ = emisiones de metano derivadas de la combustión móvil (kg)

$E_n^{N_2O}$ = emisiones de óxido nitroso derivadas de la combustión móvil (kg)

a = tipo de combustible fósil (diésel, gasolina y lubricantes)

Statistical analysis

The type of probability density function of GHG emissions, corresponding to A1 and A2, was determined by the modified Shapiro-Wilks normality test and the Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit test (Lilliefors, 1967; Shapiro & Francia, 1972). The uncertainty of the activity data of A1 and A2 was evaluated from the construction of 95 % confidence intervals (IPCC, 2006). Activity data that showed variability different from normal were treated with bootstrap simulation with 500 repetitions (Frey & Rhodes, 1996; Manly, 1997). Uncertainty was expressed in terms of percentage relative to the arithmetic mean. This percentage was entered into the Aggregation statistical parameter uncertainty in GHG inventories version 2003, to obtain the aggregate and cumulative uncertainty. The calculation tool assigns a range of precision to uncertainty that can be high, good, fair or low (WBCSD & WRI, 2003). Significant influences of GHG emissions between annuities were identified through parametric (Student *t*-test for two independent samples) and non-parametric (Wilcoxon test for two independent samples) inferential statistics. GHG emissions from sawmills were compared to the Kruskal-Wallis median range test. The statistical analysis was performed with the support of the InfoStat program version 2018 (Di Rienzo et al., 2010).

Results and discussion

Scope 1: direct emissions

Table 2 contains the annual segregation of direct GHG emissions from mobile combustion. On the one hand, analysis by parametric inferential statistics suggested significant difference of direct GHG emissions to the atmosphere between S17 and S18 for L1. The disaggregated activity data revealed that the company carried out forest extraction operations with own sources, increasing diesel consumption during the first half of the annuity S17 due to the use of cranes and tractors. For this reason, the amount of direct emissions in S17 (174.33 tCO₂e) was approximately one third higher than in S18 (107.17 tCO₂e). On the other hand, Wilcoxon's test determined that there was no significant difference in this type of GHG emissions between S17 and S18 for L2; in other words, fossil fuel consumption was analogous between annuities (24.53 and 18.79 tCO₂e for S17 and S18, respectively). Direct emissions represented 29.32 and 9.39 % of the carbon footprint for L1 and L2, respectively.

Under these conditions, L1 generated 238.18 tCO₂e more direct emissions (six times more) than L2. This is mainly due to the amount of fossil fuel used, since, on average, for each liter consumed in mobile emission

n = número total de combustibles fósiles

C_a = cantidad de combustible fósil consumido (TJ)

FE_a = factor de emisión por defecto respectivo al dióxido de carbono, metano y óxido nitroso (kg·TJ⁻¹)

$E_n^{CO_2e}$ = emisiones totales provenientes de los n combustibles fósiles (tCO₂e)

PCG = potencial de calentamiento global del dióxido de carbono, metano y óxido nitroso

$E_{energía\ eléctrica}^{CO_2e}$ = emisiones derivadas de la energía eléctrica (tCO₂e)

$C_{energía\ eléctrica}$ = cantidad de energía eléctrica consumida (MWh)

$FE_{energía\ eléctrica}$ = factor de emisión del sistema eléctrico nacional (tCO₂e·MWh⁻¹)

Los factores de emisión por defecto, publicados por el IPCC (2006), se seleccionaron para determinar la cantidad de emisiones derivadas de la categoría combustión móvil; los potenciales del calentamiento global fueron tomados del quinto reporte de evaluación (AR5) del IPCC (2015). También los factores de emisión del sistema eléctrico nacional, divulgados por la Comisión Reguladora de Energía (CRE, 2017, 2019), se emplearon para calcular las emisiones asociadas a la categoría energía eléctrica.

Análisis estadístico

El tipo de función de densidad de probabilidad de las emisiones de GEI, correspondientes a A1 y A2, se determinó mediante la prueba de normalidad Shapiro-Wilks modificado y la prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov (Lilliefors, 1967; Shapiro & Francia, 1972). La incertidumbre de los datos de actividad de A1 y A2 se evaluó a partir de la construcción de intervalos de confianza de 95 % (IPCC, 2006). Los datos de actividad que mostraron variabilidad diferente a la normal fueron tratados con la simulación *bootstrap* con 500 repeticiones (Frey & Rhodes, 1996; Manly, 1997). La incertidumbre se expresó en términos de porcentaje relativo a la media aritmética. Este porcentaje se introdujo en la herramienta de cálculo *Aggregation statistical parameter uncertainty in GHG inventories version 2003*, para obtener la incertidumbre agregada y la acumulada. La herramienta de cálculo asigna un rango de precisión a la incertidumbre que puede ser alto, bueno, justo o bajo (WBCSD & WRI, 2003). Las influencias significativas de emisiones de GEI entre anualidades se identificaron a través de estadísticas inferenciales paramétricas (prueba *t* de Student para dos muestras independientes) y no paramétricas (prueba de Wilcoxon para dos muestras independientes). Las emisiones de GEI de los aserraderos se compararon con la prueba de rangos de la mediana de Kruskal-Wallis. El análisis estadístico se realizó con apoyo del programa InfoStat versión 2018 (Di Rienzo et al., 2010).

Table 2. Direct emissions (mobile combustion) of greenhouse gases, segregated annually (S17 = 2017 and S18 = 2018), by two forestry companies (organizational boundaries L1 and L2) dedicated to the primary transformation of wood in the region of El Salto, Durango.

Cuadro 2. Emisiones directas (combustión móvil) de gases de efecto invernadero, segregadas anualmente (S17 = 2017 y S18 = 2018), por dos empresas forestales (límites organizacionales L1 y L2) dedicadas a la transformación primaria de la madera en la región de El Salto, Durango.

Variable	Emission source / Fuente de emisión	Mean (tCO ₂ e) / Media (tCO ₂ e)	Minimum (tCO ₂ e) / Mínimo (tCO ₂ e)	Maximum (tCO ₂ e) / Máximo (tCO ₂ e)	Total (tCO ₂ e)	P
Annuities of L1 / Anualidades de L1						
S17	Diesel (cranes, tractors and forklifts) / Diésel (grúas, tractocamiones y montacargas)	13.05 ± 7.85	0.36	25.46	156.66	0.0375*
	Gasoline (vehicles) / Gasolina (automóviles)	1.02 ± 0.48	0.21	1.78	12.26	
	Gasoline (chainsaws) / Gasolina (motosierras)	0.35 ± 0.17	0.07	0.61	4.21	
	Lubricants (chainsaws) / Lubricantes (motosierras)	0.10 ± 0.05	0.02	0.18	1.20	
S18	Diesel (forklift) / Diésel (montacargas)	6.07 ± 1.48	2.70	7.77	72.83	
	Gasoline (vehicles) / Gasolina (automóviles)	2.10 ± 1.05	0.71	3.83	25.15	
	Gasoline (chainsaws) / Gasolina (motosierras)	0.72 ± 0.36	0.24	1.31	8.63	
	Lubricants (chainsaws) / Lubricantes (motosierras)	0.05 ± 0.02	0.02	0.09	0.56	
Annuities of L2 / Anualidades de L2						
S17	Diesel (forklift) / Diésel (montacargas)	1.31 ± 0.61	0	1.58	15.78	0.2467 ^{ns}
	Gasoline (vehicles) / Gasolina (automóviles)	0.68 ± 0.32	0	0.81	8.11	
	Gasoline (chainsaws) / Gasolina (motosierras)	0.04 ± 0.02	0	0.05	0.49	
	Lubricants (chainsaws) / Lubricantes (motosierras)	0.01 ± 0.01	0	0.02	0.15	
S18	Diesel (forklift) / Diésel (montacargas)	0.92 ± 0.81	0	1.58	11.04	
	Gasoline (vehicles) / Gasolina (automóviles)	0.61 ± 0.37	0	0.81	7.30	
	Gasoline (chainsaws) / Gasolina (motosierras)	0.03 ± 0.03	0	0.05	0.34	
	Lubricants (chainsaws) / Lubricantes (motosierras)	0.01 ± 0.01	0	0.02	0.11	

±Standard deviation from the mean; *P < 0.05 (t Student); ns = not significant (Wilcoxon test).

±Desviación estándar de la media; *P < 0.05 (t de Student); ns = no significativo (prueba de Wilcoxon).

sources (light duty and heavy-duty off-road vehicles) of L2, 6.12 L were consumed for L1. It should be noted that, in both L1 and L2, the type of fuel that represented the highest consumption was diesel (between 55 and 78 %) compared to the consumption of gasoline (between 22 and 42 %) and additive lubricants (less than 1 %). The study by Loeffler, Anderson, Morgan, and Sorenson (2016) indicated that 61 % of the fuel consumed in sawmill operations was diesel used by on-site rolling equipment, while only 3 % was gasoline. In the situation of this study, the emission source that provided the largest mass of direct GHG emissions was the forklift, because it is the only heavy-duty off-road vehicle within L1 and L2 that uses diesel. Therefore, the specific operations in wood transformation process that respond to this contribution were yard roundwood management and control and yard sawn wood management.

Scope 2: indirect emissions

The annual GHG emissions from indirect electricity-using equipment owned by L1 and L2 are shown in Table 3. The application of the Student t-test on L1 and the Wilcoxon test on L2 suggested that there is no significant difference in indirect GHG emissions to the atmosphere between annuities. Under this criterion, the active power demand in these units was similar in annuities S17 and S18. During the observation period, it was possible to verify that the use of computer equipment in office activities was systematic and that the lighting system is controlled by regular on/off cycles; in addition, electric motors were used according to the working day, saw changes and sawn wood manufacturing according to the performance of each sawmill.

Resultados y discusión

Alcance 1: emisiones directas

El Cuadro 2 contiene la segregación anual de las emisiones directas de GEI por combustión móvil. Por un lado, el análisis mediante estadística inferencial paramétrica sugirió diferencia significativa de emisiones directas de GEI a la atmósfera entre las anualidades S17 y S18 en L1. Los datos de actividad desagregados revelaron que la empresa ejecutó operaciones de extracción forestal con fuentes propias, aumentando el consumo de diésel durante el primer semestre de la anualidad S17, debido al uso de grúas y tractocamiones. Por esta razón, la cantidad de emisiones directas en S17 (174.33 tCO₂e) fue aproximadamente un tercio mayor que en S18 (107.17 tCO₂e). Por otro lado, la prueba de Wilcoxon determinó que no hubo diferencia significativa de este tipo de emisiones de GEI entre S17 y S18 en L2; en otras palabras, el consumo de combustibles fósiles fue análogo entre anualidades (24.53 y 18.79 tCO₂e para S17 y S18, respectivamente). Las emisiones directas representaron 29.32 y 9.39 % de la huella de carbono en L1 y L2 de manera respectiva.

Bajo estas condiciones, L1 generó 238.18 tCO₂e más emisiones directas (seis veces más) que L2. Esto se debe principalmente a la cantidad de combustible fósil utilizado, ya que, en promedio, por cada litro consumido en fuentes de emisión móviles (vehículos para servicio ligero y servicio pesado todo terreno) de L2, 6.12 L fueron consumidos en L1. Hay que destacar que, tanto en L1 como en L2, el tipo de combustible que representó el mayor consumo fue el diésel (entre 55 y 78 %) comparado con el consumo de gasolina (entre 22 y 42 %) y lubricantes aditivos (menor de 1 %). El estudio

Table 3. Indirect emissions (electric motors, lighting and computer equipment) of greenhouse gases, segregated annually (S17 = 2017 and S18 = 2018), by two forestry companies (organizational boundaries L1 and L2) dedicated to the primary transformation of wood in the region of El Salto, Durango.

Cuadro 3. Emisiones indirectas (motores eléctricos, iluminación y equipo informático) de gases de efecto invernadero, segregadas anualmente (S17 = 2017 y S18 = 2018), por dos empresas forestales (límites organizacionales L1 y L2) dedicadas a la transformación primaria de la madera en la región de El Salto, Durango.

Variable	Mean (tCO ₂ e)/ Media (tCO ₂ e)	Minimum (tCO ₂ e)/ Mínimo (tCO ₂ e)	Maximum (tCO ₂ e)/ Máximo (tCO ₂ e)	Total (tCO ₂ e)	P
Annuities of L1 / Anualidades de L1					
S17	6.13 ± 1.18	3.72	7.51	73.58	0.1371 ^{ns}
S18	5.54 ± 0.59	4.11	6.29	66.48	
Annuities of L2 / Anualidades de L2					
S17	2.59 ± 1.42	0.58	4.14	31.07	0.1186 ^{ns}
S18	1.94 ± 0.85	0.56	3.34	23.23	

±Standard deviation of the mean; ns = not significant ($P > 0.05$) according to Student (L1) and Wilcoxon (L2) *t* tests.

±Desviación estándar de la media; ns = no significativo ($P > 0.05$) de acuerdo con las pruebas *t* de Student (L1) y Wilcoxon (L2).

The calculation of indirect emissions for L1 (70.03 tCO₂e-year⁻¹) recorded more than twice as much GHG as L2 (27.15 tCO₂e-year⁻¹). This fact is aligned from the perspective that L1 has two sawmills and therefore more electric motors absorbing electrical energy compared to L2. The contribution of indirect emissions to L1's carbon footprint is equivalent to 14.59 % and 11.78 % for L2. According to Hanitsch (2002), electric motors consume more than two thirds of the electric energy in industry, lighting 6 % and the rest belongs to other equipment. Therefore, the largest amount of GHG was attributed to electric motors, which released 50.04 tCO₂e-year⁻¹ corresponding to L1 and 18.73 tCO₂e-year⁻¹ to L2. Depending on the nominal power of the electric motors, the use of the band saw contributed more indirect GHG emissions than table saws.

Scope 3: Other indirect emissions

The largest contribution of GHG emissions to the carbon footprint of the primary wood processing industry was recorded in the raw material transport operation, reaching 56.09 % for L1 and 78.83 % for L2. The estimated values were 269.28 tCO₂e-year⁻¹ for L1 and 181.75 tCO₂e-year⁻¹ for L2 (Table 4). Diesel was the main fossil fuel used in the transportation of round wood. Calculations showed an average of 40.61 tCO₂e-year⁻¹ per tractor. Huang, Weber, and Matthews (2009) indicate that, on average, more than 75 % of the industry sector's carbon footprint is attributed to scope 3. Likewise, Lindholm and Berg (2005) mention that the transportation of roundwood consumes the largest amount of fuels in the supply chain.

realizado por Loeffler, Anderson, Morgan, y Sorenson (2016) indicó que 61 % del combustible consumido en operaciones de un aserradero fue el diésel usado por equipo rodante en el sitio, mientras que solo 3 % correspondió a la gasolina. En la situación del presente estudio, la fuente de emisión que contribuyó con la mayor masa de emisiones directas de GEI fue el montacargas, ya que es el único vehículo para servicio pesado todo terreno, dentro de L1 y L2, que utiliza diésel. Por tanto, las operaciones específicas del proceso de transformación de la madera que responden a esta contribución fueron manejo y control de madera en rollo en patio y manejo de madera aserrada en patio.

Alcance 2: emisiones indirectas

Las emisiones de GEI anuales provenientes indirectamente de equipos consumidores de energía eléctrica que son propiedad de L1 y L2 se muestran en el Cuadro 3. La aplicación de la prueba *t* de Student en L1 y la prueba de Wilcoxon en L2 sugirió que no existe diferencia significativa de emisiones indirectas de GEI a la atmósfera entre anualidades. Bajo este criterio, la demanda de potencia activa en estos equipos fue similar en las anualidades S17 y S18. Durante el periodo de observación fue posible constatar que el uso de equipo informático en actividades de oficina era sistemático y que el sistema de iluminación se controla por ciclos regulares de encendido y apagado; además, los motores eléctricos se usaron en función de la jornada laboral, cambios de sierras y la manufactura de madera aserrada correspondiente al desempeño de cada aserradero.

El cálculo de las emisiones indirectas en L1 (70.03 tCO₂e-año⁻¹) registró más del doble de GEI que

Table 4. Other indirect emissions derived from the transport of raw material in two forestry companies (organizational boundaries L1 and L2) dedicated to the primary transformation of wood in the region of El Salto, Durango.

Cuadro 4. Otras emisiones indirectas derivadas del transporte de materia prima en dos empresas forestales (límites organizacionales L1 y L2) dedicadas a la transformación primaria de la madera en la región de El Salto, Durango.

Organizational boundaries/ Límite organizacional	Emission source/ Fuente de emisión	Mean (tCO ₂ e)/ Media (tCO ₂ e)	Minimum (tCO ₂ e)/ Mínimo (tCO ₂ e)	Maximum (tCO ₂ e)/ Máximo (tCO ₂ e)
L1	Diesel (Az Kenworth trucks 1981, Kenworth 1981, Kenworth 1996, Freightliner 1984, Tamsa 1986 and Freightliner 1990)	44.88 ± 18.64	25.75	77.24
L2	Diesel (Camiones International 1994, International (year unknown), Volvo 1986, Frightliner 1997 and Dodge 1983)	36.35 ± 11.67	23.85	51.12

±Standard deviation of the mean.

±Desviación estándar de la media.

Rivela, Moreira, and Feijoo (2007) explain that an important characteristic to consider is the distribution routes of the transport of round wood. According to Michelsen, Solli, and Strømman (2008), there are large variations in emissions from log transport due to the dimensions of the wood, transport distances in the forest, and in particular the distances travelled from the extraction areas to the sawmills. Another point is that the mechanical technology used in the trucks designated to the raw material transport are over 35 years old. It should be noted that emissions and distance traveled vary each year depending on the age of the vehicle; older vehicles tend to travel less but may emit more CH₄ per unit of fuel volume (IPCC, 2006).

Uncertainty of the GHG emissions inventory

The cumulative uncertainty showed good and fair accuracy ranges as shown in Table 5. The calculation included uncertainty of the collected activity data and the uncertainty of the IPCC (2006) default emission factors. The Environmental Protection Agency (EPA, 2011) estimated an uncertainty of $\pm 17\%$ for CO₂ emissions from all industries in the United States. On the other hand, Heath et al. (2010) made a GHG profile for the value chain of forest products industry and had an uncertainty of $\pm 25\%$ in the indirect emissions associated with the purchase of electrical energy and $\pm 15\%$ in the direct emissions derived from the manufacture of forest products.

L2 (27.15 tCO₂e-año⁻¹). Este hecho se alinea desde la perspectiva de que en L1 existen dos aserraderos y, por consiguiente, más motores eléctricos que absorben energía eléctrica en comparación con L2. La contribución de las emisiones indirectas a la huella de carbono de L1 equivale a 14.59 % y 11.78 % para L2. De acuerdo con Hanitsch (2002), los motores eléctricos consumen más de dos tercios de la energía eléctrica en la industria, la iluminación el 6 % y el resto pertenece a otros equipos. Por consiguiente, la mayor cantidad de GEI se atribuyó a los motores eléctricos, los cuales liberaron 50.04 tCO₂e-año⁻¹ correspondientes a L1 y 18.73 tCO₂e-año⁻¹ a L2. En función de la potencia nominal de los motores eléctricos, el uso de la sierra banda aportó más cantidad de emisiones indirectas de GEI que el trocero péndulo y el desorillador.

Alcance 3: Otras emisiones indirectas

La mayor contribución de emisiones de GEI a la huella de carbono de la industria de transformación primaria de la madera se registró en la operación de transporte de materia prima, alcanzando 56.09 % en L1 y 78.83 % en L2. Los valores estimados fueron 269.28 tCO₂e-año⁻¹ para L1 y 181.75 tCO₂e-año⁻¹ para L2 (Cuadro 4). El diésel fue el principal combustible fósil empleado en el transporte de madera en rollo. Los cálculos exhibieron un promedio de 40.61 tCO₂e-año⁻¹ por tractocamión. Huang, Weber, y Matthews (2009) indican que, en promedio, más del 75 % de la huella de carbono del

Table 5. Accuracy ranges of the cumulative uncertainty in the emission of greenhouse gases in two annuities (S17 = 2017 and S18 = 2018) of two forestry companies (organizational boundaries L1 and L2) dedicated to the primary transformation of wood in the region of El Salto, Durango.

Cuadro 5. Rangos de precisión de la incertidumbre acumulada en la emisión de gases de efecto invernadero en dos anualidades (S17 = 2017 y S18 = 2018) de dos empresas forestales (límites organizacionales L1 y L2) dedicadas a la transformación primaria de la madera en la región de El Salto, Durango.

Variable	Activity Data/ Dato de actividad	Mean/ Media	Standard Error/ Error estándar	Lower Limit/ Límite inferior	Upper Limit/ Límite superior	Aggregate Uncertainty (%)/ Incertidumbre agregada (%)	Cumulative Uncertainty (%)/ Incertidumbre acumulada (%)	Range of Accuracy/ Rango de precisión
Annuities of L1 / Anualidades de L1								
S17	126.42 MWh	10.535	0.583	9.250	11.820	± 14.1	± 24.6	Fair
	2.16 TJ	0.180	0.028	0.117	0.243	± 35.0		
S18	126.14 MWh	10.512	0.321	9.805	11.21	± 9.7	± 9.3	Good
	1.37 TJ	0.114	0.007	0.098	0.133	± 14.3		
Annuities of L2 / Anualidades de L2								
S17	53.39 MWh	4.486	0.646	3.179	5.706	± 32.5	± 22.2	Fair
	0.32 TJ	0.026	0.003	0.017	0.031	± 28.6		
S18	44.08 MWh	3.674	0.46	2.647	4.700	± 28.8	± 24.3	Fair
	0.24 TJ	0.020	0.0039	0.012	0.027	± 42.1		

Ranges indicated by WBCSD and WRI (2003).

Rangos indicados por WBCSD y WRI (2003).

According to the WRI and WBCSD (2003), the true value of the GHG emission estimate subject to a good accuracy range has a 95 % probability of being within ± 15 % of the estimated value. Although the success and transparency of the uncertainty analysis requires an extensive analysis, in practice the complete information may not be available, therefore the exact emission figures will always be unknown (IPCC, 2001). To track percentage changes from the first year, Rypdal and Winiwarter (2001) mention that the time series should be consistent, cover the same sources, and be based on the same assumptions.

Comparison of GHG emissions between sawmills

The observation of the displacement cycles of the forklift revealed that these depend on the layout of the production line, so the effective time of the operations carried out in each sawmill (Q2, Q1 and D) was discarded as a differentiating factor because it was not significant ($P = 0.2071$; median = 0.25, 0.28 and 0.31 h; standard deviation = 0.23, 0.30 and 0.38 h; average of ranges = 234.75, 248.65 and 263.98). However, the technical specifications of the forklift used in D (Michigan[®] 55R, 112 HP) vary from the forklifts used in Q1 and Q2 (both CASE[®] W30, 153 HP); in addition, the diesel expense in D (11.32 L·h⁻¹) compared to Q1 (9.03 L·h⁻¹) and Q2 (9.53 L·h⁻¹) is higher. Therefore, it is attributed that the type of mechanical technology and corresponding fuel consumption are the differentiating factor of direct GHG emissions in forklifts (Table 6). Eshun, Potting, and Leemans (2010) highlight that GHG emissions are different among sawmills because of the technologies, methods and environmental standards applied. Similarly, Berg and Karjalainen (2003) attribute the differences to variations in operations, technology and the quality of fuel used.

With respect to the demand for active power in electric motors, it was ruled out that the differentiating factor depended on its efficiency, because there was no significant difference in the power factor measured at the main switch of Q2, Q1 and D ($P = 0.0783$; median = 67.40, 66.75 and 60.80 %; standard deviation = 27.47, 22.60 and 24.34 %; average of ranges = 638.01, 678.90 and 620.98). Ratnasingam et al. (2015) explain that the difference in electrical energy consumption can be attributed to the number of motors needed to operate a machine. However, although the diameter of the processed round wood was not measured, it was observed that the demand for active power increased when sawing larger diameters and vice versa. This is consistent with Devaru, Maddula, Grushecky, and Gopalakrishnan (2014), who developed a study on specific energy consumption in three sawmills showing that the denser species consume more energy than the less dense ones; furthermore, the results also

sector industrial se atribuye al alcance 3. Asimismo, Lindholm y Berg (2005) mencionan que el transporte de madera en rollo consume la mayor cantidad de combustibles en la cadena de suministro.

Rivela, Moreira, y Feijoo (2007) explican que una característica importante a considerar son las rutas de distribución del transporte de la madera en rollo. Según Michelsen, Solli, y Strømman (2008), hay grandes variaciones en las emisiones provenientes del transporte de madera en rollo, debido a las dimensiones de la madera, a las distancias de transporte en el bosque y, en particular, a las distancias recorridas desde las áreas de extracción hasta los aserraderos. Otro punto es que la tecnología mecánica empleada en los tractocamiones designados a la operación de transporte de materia prima excede los 35 años de antigüedad. Se debe tener en cuenta que las emisiones y la distancia recorrida varían cada año según la antigüedad del vehículo; los más antiguos suelen viajar menos, pero pueden emitir más CH₄ por unidad de volumen de combustible (IPCC, 2006).

Incertidumbre del inventario de emisiones de GEI

La incertidumbre acumulada mostró rangos de precisión justo y bueno como se muestra en el Cuadro 5. El cálculo incluyó la incertidumbre de los datos de actividad recolectados y la de los factores de emisión por defecto del IPCC (2006). La Environmental Protection Agency (EPA, 2011) estimó una incertidumbre de ± 17 % para las emisiones de CO₂ de todas las industrias de los Estados Unidos. Por otra parte, Heath et al. (2010) hicieron un perfil de GEI para la cadena de valor de la industria de productos forestales y obtuvieron una incertidumbre de ± 25 % en las emisiones indirectas asociadas con la compra de energía eléctrica y ± 15 % en las emisiones directas derivadas de la manufactura de productos forestales.

Según el WRI y WBCSD (2003), el valor verdadero de la estimación de emisiones de GEI sometido a un rango de precisión bueno tiene una probabilidad del 95 % de estar dentro de ± 15 % del valor estimado. Aunque el éxito y la transparencia del análisis de incertidumbre requiere de un análisis exhaustivo, en la práctica quizá no se pueda disponer de la información completa, por tanto las cifras exactas de emisión siempre serán desconocidas (IPCC, 2001). Para dar seguimiento a los cambios porcentuales a partir de la primera anualidad, Rypdal y Winiwarter (2001) mencionan que la serie de tiempo debe ser coherente, cubrir las mismas fuentes y basarse en los mismos supuestos.

Comparación de emisiones de GEI entre aserraderos

La observación de los ciclos de desplazamiento en patio del montacargas reveló que estos dependen del

Table 6. Contrast of greenhouse gas emissions from mobile combustion sources (A1) and electrical energy (A2) in the sawmills of two forestry companies dedicated to the primary transformation of wood in the region of El Salto, Durango.

Cuadro 6. Contraste de emisiones de gases efecto invernadero provenientes de fuentes de combustión móvil (A1) y energía eléctrica (A2) en los aserraderos de dos empresas forestales dedicadas a la transformación primaria de la madera en la región de El Salto, Durango.

Scope/ Alcance	Sawmill/ Aserradero	n	Mean (tCO ₂ e)/ Media (tCO ₂ e)	Median (tCO ₂ e)/ Mediana (tCO ₂ e)	Average of ranges*/ Promedio de rangos*	P
A1	Q2	181	0.0095 ± 0.0087	0.0070	225.5801 a	0.0009
	Q1	186	0.0102 ± 0.0082	0.0082	242.0806 a	
	D	127	0.0149 ± 0.0136	0.0106	286.6772 b	
A2	Q2	158	0.0406 ± 0.0100	0.0388	136.3196 a	0.0001
	Q1	152	0.0473 ± 0.0101	0.0467	204.2270 b	
	D	148	0.0666 ± 0.0158	0.0673	354.9324 c	

n = sample size. ±Standard deviation of the mean. *Average of ranges with a common letter are not significantly different according to the Kruskal-Wallis test ($\alpha = 0.05$)

n = tamaño de muestra. ±Desviación estándar de la media. *Promedio de rangos con una letra común no son significativamente diferentes de acuerdo con la prueba de Kruskal-Wallis ($\alpha = 0.05$)

indicated that specific energy consumption increases as the percentage of four-quarter wood increases and, conversely, consumption decreases as the percentage of edges and sawn wood increases.

Conclusions

Carbon footprint is unique to each forest company engaged in primary wood processing; the annual net flows of direct and indirect GHG emissions depend largely on the amount of energy consumed in the processing operations of each company. The type of mechanical technology applied in round wood and sawn wood operations is the differentiating factor for direct GHG emissions between sawmills because the effective time of use of the forklift does not significantly influence. The power factor and therefore the efficiency of the electric motors used in sawing, sanitation and sizing operations do not significantly influence the indirect GHG emissions between sawmills. The exact figures of GHG emissions will always be unknown; therefore, the management of error limits allows reducing uncertainty.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Durango (COCYTED) for funding the research project "Estimation of the carbon footprint in forestry companies in the region of El Salto, Durango" from which this paper was derived.

End of English version

diseño y distribución de la línea de producción, por lo que el tiempo efectivo de las maniobras realizadas en cada aserradero (Q2, Q1 y D) fue descartado como factor diferenciador por no haber sido significativo ($P = 0.2071$; mediana = 0.25, 0.28 y 0.31 h; desviación estándar = 0.23, 0.30 y 0.38 h; promedio de rangos = 234.75, 248.65 y 263.98). No obstante, las especificaciones técnicas del montacargas utilizado en D (Michigan® 55R, 112 HP) varían de los montacargas empleados en Q1 y Q2 (ambos CASE® W30, 153 HP); además, el gasto de diésel en D (11.32 L·h⁻¹) comparado con Q1 (9.03 L·h⁻¹) y Q2 (9.53 L·h⁻¹) es superior. Por tanto, se atribuye que el tipo de tecnología mecánica y su correspondiente gasto de combustible son el factor diferenciador de emisiones directas de GEI en los montacargas (Cuadro 6). Eshun, Potting, y Leemans (2010) destacan que las emisiones de GEI son diferentes entre aserraderos como resultado de las tecnologías, métodos y estándares ambientales aplicados. De igual manera, Berg y Karjalainen (2003) atribuyen las diferencias a las variaciones en las operaciones, la tecnología y a la calidad del combustible utilizado.

Con respecto a la demanda de potencia activa en motores eléctricos, se descartó que el factor diferenciador dependiera de su eficiencia, ya que no hubo diferencia significativa en el factor de potencia medido en el interruptor principal de Q2, Q1 y D ($P = 0.0783$; mediana = 67.40, 66.75 y 60.80 %; desviación estándar = 27.47, 22.60 y 24.34 %; promedio de rangos = 638.01, 678.90 y 620.98). Ratnasingam et al. (2015) argumentan que la diferencia en el consumo de energía eléctrica puede atribuirse a la cantidad de motores necesarios

EReferences / Referencias

- Adhikari, S., & Ozarska, B. (2018). Minimizing environmental impacts of timber products through the production process “from sawmill to final products”. *Environmental Systems Research*, 7(1), 6. doi: 10.1186/s40068-018-0109-x
- Berg, S., & Karjalainen, T. (2003). Comparison of greenhouse gas emissions from forest operations in Finland and Sweden. *Forestry*, 76(3), 271–284. doi: 10.1093/forestry/76.3.271
- Comisión Reguladora de Energía (CRE). (2017). Factor de emisión del sector eléctrico nacional. Retrieved from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/304573/Factor_de_Emisi_n_del_Sector_Elctrico_Nacional_1.pdf
- Comisión Reguladora de Energía (CRE). (2019). Factor de emisión del sector eléctrico nacional. Retrieved from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/442910/Aviso_Factor_de_Emisiones_2018.pdf
- Devaru, D. G., Maddula, R., Grushecky, S. T., & Gopalakrishnan, B. (2014). Motor-based energy consumption in west Virginia sawmills. *Forest Products Journal*, 64(1), 33–40. doi: 10.13073/FPJ-D-13-00070
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M., & Robledo, Y. C. (2010). InfoStat versión 2018. Argentina: Universidad Nacional de Córdoba.
- Environmental Protection Agency (EPA). (2011). Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks: 1990-2009. Retrieved from https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/us-ghg-inventory-2011-complete_report.pdf
- Eshun, J. F., Potting, J., & Leemans, R. (2010). Inventory analysis of the timber industry in Ghana. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(7), 715–725. doi: 10.1007/s11367-010-0207-0
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2010). *Impact of the global forest industry on atmospheric greenhouse gases*. Rome, Italy: Author. Retrieved from <http://www.fao.org/3/i1580e/i1580e00.pdf>
- Frey, H. C., & Rhodes, D. S. (1996). Characterizing, simulating and analyzing variability and uncertainty: An illustration of methods using an air toxics emissions example. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2(4), 762–797. doi: 10.1023/A:1006962412150
- Frohmann, A., Herreros, S., Mulder, N., & Olmos, X. (2012). Huella de carbono y exportaciones de alimentos: Guía práctica. Retrieved from <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/4013>
- Galli, A., Wiedmann, T., Ercin, E., Knoblauch, D., Ewing, B., & Giljum, S. (2012). Integrating ecological, carbon and water footprint into a “footprint family” of indicators: definition and role in tracking human pressure on the planet. *Ecological Indicators*, 16, 100–112. doi: 10.1016/j.ecolind.2011.06.017
- Goodier, C. (2011). *Carbon footprint calculator*. In D. Mulvaney, & P. Robbins (Eds.), *Green Technology: An A-to-Z*

para operar una máquina. Ahora bien, aunque no se midió el diámetro de la madera en rollo sometida a proceso, se observó que la demanda de potencia activa aumentaba al aserrar diámetros mayores y viceversa. Esto coincide con Devaru, Maddula, Grushecky, y Gopalakrishnan (2014), quienes desarrollaron un estudio sobre el consumo de energía específico en tres aserraderos demostrando que las especies más densas consumen más energía que las menos densas; además, los resultados también indicaron que el consumo de energía específico aumenta a medida que el porcentaje de madera de cuatro cuartos incrementa y, por el contrario, el consumo disminuye a medida que el porcentaje de cantos y madera aserrada aumenta.

Conclusiones

La huella de carbono es única para cada empresa forestal dedicada a la transformación primaria de la madera; los flujos netos anuales de emisiones directas e indirectas de los GEI dependen en gran medida de la cantidad de energía consumida en las operaciones de proceso de cada empresa. El tipo de tecnología mecánica aplicada en operaciones de manejo de madera en rollo y aserrada en patio es el factor diferenciador de emisiones directas de los GEI entre aserraderos, debido a que el tiempo efectivo de uso del montacargas no influye significativamente. El factor de potencia y, por consiguiente, la eficiencia de los motores eléctricos empleados en operaciones de aserrío, saneamiento y dimensionado no influyen significativamente en las emisiones indirectas de los GEI entre aserraderos. Las cifras exactas de emisiones de los GEI siempre serán desconocidas; por lo tanto, la gestión de los límites de error permite reducir la incertidumbre.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Durango (COCYTED) por el financiamiento al proyecto de investigación “Estimación de la huella de carbono en empresas forestales de la región de El Salto, Durango” del cual se originó el presente escrito.

Fin de la versión en español

- Guide (pp. 86–88). London: SAGE Publications. doi: 10.4135/9781412975704
- Hanitsch, R. (2002). Energy efficient electric motors. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Rolf_Dr_Hanitsch/publication/267838427_ENERGY_EFFICIENT_ELECTRIC_MOTORS/links/55d43c0d08ae0b8f3ef93f1d/ENERGY-EFFICIENT-ELECTRIC-MOTORS.pdf
- Heath, L. S., Maltby, V., Miner, R., Skog, K. E., Smith, J. E., Unwin, J., & Upton, B. (2010). Greenhouse gas and carbon profile of the US forest products industry value chain. *Environmental Science & Technology*, 44(10), 3999–4005. doi: 10.1021/es902723x
- Huang, Y. A., Weber, C. L., & Matthews, H. S. (2009). Categorization of scope 3 emissions for streamlined enterprise carbon footprinting. *Environmental Science & Technology*, 43(22), 8509–8515. doi: 10.1021/es901643a
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2001). Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. In J. Penman, D. Kruger, I. Galbally, T. Hiraiishi, B. Nyenzi, S. Emmanuel, ... K. Tanabe (Eds.), *La cuantificación de las incertidumbres en la práctica* (pp. 6.1–6.35). Hayama, Japan: Author. Retrieved from https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/spanish/6_Uncertainty_ES.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories* (H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, & K. Tanabe [Eds.]). Japan: IGES. Retrieved from https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/0_Overview/V0_0_Cover.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2015). *Climate Change 2014: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Core Writing Team, R. K. Pachauri, & L. A. Meyer [Eds.]). Geneva, Switzerland: Author. Retrieved from www.ipcc.ch/report/ar5/syr/
- Jiménez, R. M. (2010). Estimación de emisiones de GEI en inventarios corporativos. *Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 1(1), 40–43. Retrieved from https://www.inegi.org.mx/rde/rde_01/doctos/rde_01_art5.pdf
- Lilliefors, H. W. (1967). On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown. *Journal of the American statistical Association*, 62(318), 399–402. doi: 10.1080/01621459.1967.10482916
- Lindholm, E. L., & Berg, S. (2005). Energy requirement and environmental impact in timber transport. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 20(2), 184–191. doi: 10.1080/02827580510008329
- Loeffler, D., Anderson, N., Morgan, T. A., & Sorenson, C. B. (2016). On-site energy consumption at softwood sawmills in Montana. *Forest Products Journal*, 66(3), 155–163. doi: 10.13073/FPJ-D-14-00108
- Manly, B. F. J. (1997). *Randomization, bootstrap, and Monte Carlo methods in biology*. New York, USA: Chapman and Hall. doi: 10.1201/9781315273075
- Michelsen, O., Solli, C., & Strømman, A. H. (2008). Environmental impact and added value in forestry operations in Norway. *Journal of Industrial Ecology*, 12(1), 69–81. doi: 10.1111/j.1530-9290.2008.00008.x
- Miner, R., & Perez-Garcia, J. (2007). The greenhouse gas and carbon profile of the global forest products industry. *Forest Products Journal*, 57(10), 80–90. Retrieved from http://www.ncasi.org/wp-content/uploads/2019/02/Miner_Perez-Garcia_FPJ_Oct07.pdf
- Muthu, S. S. (2016). *The carbon footprint handbook*. Boca Raton, USA: CRC Press. doi: 10.1201/b18929
- Rainforest Alliance. (2010). Manual de buenas prácticas en aserraderos de comunidades forestales. Retrieved from <https://www.ccmss.org.mx/wp-content/uploads/Manual-de-buenas-practicas-en-aserraderos-de-comunidades-forestales.pdf>
- Ramasamy, G., Ratnasingam, J., Bakar, E. S., Halis, R., & Muttiah, N. (2015). Assessment of environmental emissions from sawmilling activity in Malaysia. *BioResources*, 10(4), 6643–6662. Retrieved from https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/viewFile/BioRes_10_4_6643_Ramasamy_Environmental_Emissions_Sawmilling_Malaysia/3797
- Ratnasingam, J., Ramasamy, G., Toong, W., Senin, A. L., Kusno, M. A., & Muttiah, N. (2015). An assessment of the carbon footprint of tropical hardwood sawn timber production. *BioResources*, 10(3), 5174–5190. doi: 10.15376/biores.10.3.5174-5190
- Reid, H., Huq, S., Inkinen, A., MacGregor, J., Macqueen, D., Mayers, J., ...Tipper, R. (2004). Using wood products to mitigate climate change. Retrieved from <http://citeserx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.48.2.5128&rep=rep1&type=pdf>
- Rivela, B., Moreira, M. T., & Feijoo, G. (2007). Life cycle inventory of medium density fibreboard. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12, 143. doi: 10.1065/lca2006.12.290
- Rypdal, K., & Winiwarer, W. (2001). Uncertainties in greenhouse gas emission inventories evaluation, comparability and implications. *Environmental Science & Policy*, 4(2-3), 107–116. doi: 10.1016/S1462-9011(00)00113-1
- Shapiro, S. S., & Francia, R. S. (1972). An approximate analysis of variance test for normality. *Journal of the American Statistical Association*, 67(337), 215–216. doi: 10.1080/01621459.1972.10481232
- Schneider, H., & Samaniego, J. (2009). La huella del carbono en la producción, distribución y consumo de bienes y servicios. Retrieved from https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/37531/S2009834_es.pdf
- Siew, R. Y. (2015). A review of corporate sustainability reporting tools (SRTs). *Journal of Environmental Management*, 164, 180–195. doi: 10.1016/j.jenvman.2015.09.010
- Wiedmann, T., & Minx, J. (2008). A definition of ‘Carbon

- Footprint'. In C. C. Pertsova (Ed.), *Ecological Economics Research Trends* (cap. 1, pp. 1–11). Hauppauge, NY, USA. Nova Science Publishers. Retrieved from https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=5999
- World Business Council Sustainable Development & World Resources Institute (WBCSD & WRI). (2005). A corporate accounting and reporting standard. Retrieved from <https://ghgprotocol.org/corporate-standard>
- World Resources Institute & World Business Council Sustainable Development (WRI & WBCSD). (2003). The greenhouse gas protocol. Calculation tools. Measurement and estimation uncertainty of GHG emissions. Retrieved from <https://ghgprotocol.org/calculation-tools>
- World Resources Institute & World Business Council Sustainable Development (WRI & WBCSD). (2011). Product life cycle accounting and reporting standard. Retrieved from https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Product-Life-Cycle-Accounting-Reporting-Standard_041613.pdf