

2

ESTIMACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DE PRODUCTOS FORESTALES

Dirección Nacional de Industrias
Ministerio de Industrias, Energía y Minería
Consejo Sectorial Forestal-Madera

Andrés Dieste
Rossana Gaudioso
Montevideo, mayo 2013

Agradecimientos:

Los autores agradecen al Dr. Daniel Vázquez, Dr. Roberto Scoz, Dr. Leonidas Carrasco-Letelier y Fernando Resquín, del Instituto de Investigación Agropecuaria, la información aportada para el desarrollo de este estudio, además del acceso al software *SimaPro*. Los autores agradecen especialmente al Dr. Carrasco-Letelier la dedicación a este estudio y sus valiosas contribuciones.

El siguiente informe se realizó a solicitud de la Dirección Nacional de Industrias - Ministerio de Industria, Energía y Minería en el marco del Consejo Sectorial Forestal-Madera. La información que aquí se presenta es responsabilidad de los autores.

Puntos a destacar

- Se recomienda la utilización de programas especializados para el cálculo de la huella de carbono (HC).
- La HC de productos o servicios es propia de cada organización y no es extrapolable.
- Una HC sectorial para productos característicos tiene sentido como referencia para la industria.
- HC de trozas puestas en la planta industrial
 - eucalipto: 28,1 kg CO₂ eq m⁻³
 - pino: 28,6 kg CO₂ eq m⁻³
- El transporte a la fábrica, considerando 100 km de distancia, representa el 80% de la HC de la producción de trozas.
- HC de productos de pino puestos en planta:
 - tabla aserrada 70 kg CO₂ eq m⁻³
 - tabla seca 95 kg CO₂ eq m⁻³
 - tabla cepillada dos caras 119 kg CO₂ eq m⁻³
- Las emisiones de la fase primaria en los productos madereros (tabla aserrada, seca y cepillada) representan el 77%, 71% y 67% de la HC, respectivamente.
- El aumento de la eficiencia de aserrado de 35% a 50% implica una reducción en la HC:
 - tabla aserrada 38%
 - tabla seca 33%
 - tabla cepillada dos caras 32%
- Reducción de la HC del transporte a puerto (400 km de distancia) utilizando el ferrocarril:
 - troza 73%
 - tabla aserrada 41%
 - tabla seca 23%
 - tabla cepillada dos caras 19%

Tabla de contenido

1	Introducción.....	1
2	Caso de estudio:.....	2
3	Objetivos.....	2
4	Alcance	2
5	Unidad funcional	3
6	Metodología.....	3
6.1	Cálculo del impacto de los bienes de capital	4
6.2	Productos de eucalipto	5
6.3	Productos de pino.....	6
6.4	Descripción del proceso industrial de madera de pino	6
6.4.1	Aserrado.....	8
6.4.2	Secado.....	8
6.4.3	Cepillado dos caras	8
6.4.4	Cálculo de la producción de energía a partir de subproductos de la industria de la madera	8
7	Resultados y discusión.....	10
7.1	Utilización del <i>SimaPro</i> como herramienta para el cálculo de la huella de carbono.....	10
7.2	Cálculo de la huella de carbono	12
7.2.1	Trozas de eucalipto y pino	12
7.2.2	Productos de madera de pino	13
8	Análisis de sensibilidad.....	16
9	Identificar necesidades y oportunidades para la industria maderera local	18
10	Referencias	20

1 Introducción

Este informe es un insumo para el Plan de Trabajo propuesto por el Consejo Sectorial Forestal-Madera para 2013, dentro del objetivo Nr. 2 “Mejorar el clima de negocios manteniendo el marco de desarrollo sustentable”, realizando las siguientes acciones:

1. Estimación huella de carbono de productos de madera utilizando el programa de cálculo *SimaPro*:
 - a. trozas
 - b. celulosa
 - c. otros productos madereros
2. Identificar necesidades y oportunidades para la industria maderera local

La huella de carbono es una estimación de la cantidad de gases de efecto invernadero que se liberan a la atmósfera producto de las actividades humanas. La unidad de medida es la cantidad de dióxido de carbono equivalente al liberado por la combustión de un combustible fósil, expresado como $\text{kg CO}_2 \text{ eq m}^{-3}$ (Papendieck 2010).

El cálculo de la huella de carbono surge del análisis de ciclo de vida, que consiste en un sistema de entradas y salidas, conocido como inventarios, que incluye materiales, procesos, transporte, energía, uso y un escenario de disposición final de desechos, con su respectivo tratamiento. El total de las emisiones generada en cada categoría se divide por la unidad de producto (Figura 1).

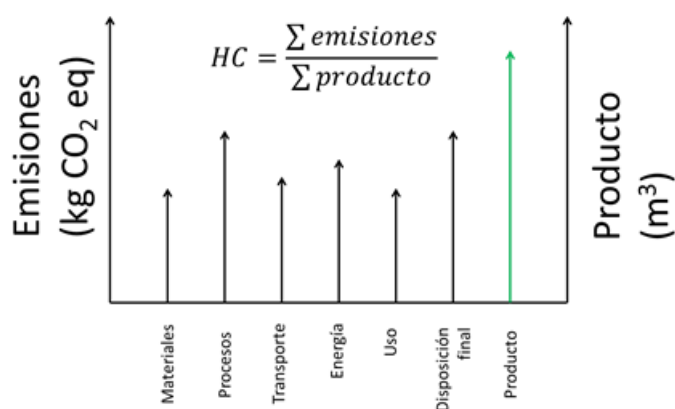


Figura 1. Diagrama de cálculo de emisiones para el análisis de ciclo de vida

Este método de análisis se utiliza para estudiar el impacto ambiental de diversos productos de madera, incluidos la madera de apariencia (Cobut et al. 2013), la madera estructural (Beyer et al. 2011; Fuchigami et al. 2012; Gobierno Vasco 2009), y la pasta de celulosa (González et al. 2011).

El análisis del ciclo de vida y el cálculo de la huella de carbono de productos de madera adquiere en los últimos años mayor importancia, con discusiones en curso sobre cómo informar al consumidor del impacto ambiental del producto (Milota et al. 2005). De esta

manera, los fabricantes buscan diferenciar sus productos de otros materiales alternativos para la construcción (concreto, metales, etc.) (Cobut et al. 2013).

2 Caso de estudio:

Este trabajo se realizó para productos forestales y madereros que actualmente se producen y exportan en Uruguay:

1. Trozas de eucalipto (*Eucalyptus grandis*) con destino a producción de pulpa de celulosa
2. Trozas de pino (*Pinus taeda*) con destino a transformación mecánica
3. Tablas de pino aserradas
4. Tablas de pino aserradas y secas
5. Tablas de pino aserradas, secas y cepilladas dos caras

En este informe no se estimó la huella de carbono de la producción de celulosa, ya que la herramienta de cálculo utilizada, *SimaPro* (PRé Consultants, Países Bajos), no cuenta en sus bases de datos con la información de las emisiones generada para la fabricación, instalación y vida útil de una planta de fabricación de celulosa. Sin perjuicio de esto, existen referencias recientes para el cálculo de emisiones producidas en el proceso de fabricación de celulosa que podrían utilizarse como fundamento para este cálculo (González et al. 2011).

3 Objetivos

1. Evaluar el software *SimaPro* (PRé Consultants, Países Bajos) como una herramienta para el cálculo de la huella de carbono.
2. Estimar la huella de carbono de trozas y de tablas de madera producidas en condiciones habituales de Uruguay.
3. Identificar los procesos que más contribuyen a la huella de carbono.
4. Desarrollar los inventarios de emisiones de los productos forestales.

4 Alcance

Este trabajo evaluó una metodología para el cálculo de huella de carbono y una herramienta para hacerlo, el software *SimaPro* (PRé Consultants, Países Bajos). Dada la meticulosidad de la información que este cálculo requiere, los resultados son solamente válidos para cada organización que los realice. Los resultados de huella de carbono no son extrapolables, ya que dependen de las condiciones específicas de producción de cada empresa/organización. Este informe debe leerse como una primera aproximación al tema para evaluar la relevancia de profundizar en este tipo de análisis en la industria maderera.

Este trabajo se realizó considerando que fuera reproducible por otros analistas. Por lo tanto, se priorizó la información con fuentes referenciadas frente a las de otro origen. Asimismo, ante la

carencia de información, el análisis se apoyó en las bases de datos existentes en el software *SimaPro* (PRÉ Consultants, Países Bajos).

El trabajo estimó la huella de carbono para tres etapas del proceso:

1. Plantaciones. Se presentó la información desde la generación de las plantas hasta el transporte de las trozas hacia las instalaciones industriales, considerando una distancia de 100 km¹. Esta estimación excluye el carbono almacenado en las plantaciones (absorciones de anhídrido carbónico).
2. Transformación mecánica. Este estudio consideró una planta industrial hipotética en la que los procesos industriales (aserrado, secado y cepillado) de madera de pino se realizan con prácticas y tecnologías industriales habituales de Uruguay.
3. Transporte. Se consideró el transporte desde la planta hasta el puerto, asumiendo una distancia de 400 km. Esta distancia es equivalente a la distancia entre Montevideo y Paysandú (373 km) o entre Montevideo y Tacuarembó (389 km).

5 Unidad funcional

La unidad de análisis utilizada fue un metro cúbico (m³) para los siguientes productos forestales: troza de eucalipto; troza de pino; tabla de pino aserrada; tabla de pino aserrada y seca; y tabla de pino aserrada, seca y cepillada dos caras.

6 Metodología

El cálculo de la huella de carbono se realizó a partir de información obtenida de empresas locales, cálculos propios y referencias bibliográficas. La fuente de información para los procesos forestales se obtuvo del proyecto “Evaluación de la sustentabilidad de potenciales cadenas agro-industriales (sorgo dulce, sorgo, boniato y forestación) para la producción de agro-energía”, generado por el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria para la Alianza de Energía y Clima de las Américas (ECPA) (Carrasco-Letelier et al. 2013; Vázquez et al. 2012).

Se utilizó el software *SimaPro* 7.3.3 (PRÉ Consultants, Países Bajos) para el procesamiento de la información. La metodología de medición del impacto fue la masa de anhídrido carbono equivalente fósil de acuerdo a la norma PAS 2050 del Instituto Británico de Normalización y *Carbon Trust*. Los factores de emisión se obtuvieron del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) 2007, considerando el potencial de calentamiento global (GWP) a 100 años (versión 1.02). Las bases de datos utilizadas fueron las siguientes: *Ecoinvent unit processes* (Centro Suizo para Inventarios de Ciclo de Vida, Suiza), *LCA Food DK* (LCA Food, Dinamarca), y *USLCI* (Laboratorio Nacional de Energía Renovable, EEUU).

¹ González et al. (2011) reportan para el caso de Chile una distancia promedio del bosque a la industria de 50 a 150 km. (González et al. 2011)

Este estudio generó un inventario de materiales, procesos, transporte, energía y un escenario de disposición final de subproductos. El escenario de disposición final de subproductos obtenidos en la fabricación del producto principal consistió en la incineración de una porción de los mismos para producir calor en forma de vapor. No se consideró la categoría uso ni la disposición final del producto principal, porque excedía el alcance del estudio (Fig. 1).

Se contabilizaron las emisiones a lo largo de la fabricación de los productos, pero no se consideró al producto de madera como un sumidero de carbono. Ya que existen diversos métodos para estimar la fijación de carbono, se optó por no considerar el carbono fijado con el objetivo de simplificar el análisis y mantener un modelo fácilmente reproducible. Está claro que cualquier fijación de carbono en el producto disminuirá la cantidad total de emisiones. Dado que cualquier producto de madera en uso es un reservorio de carbono, estimado en uno de los diversos métodos disponibles en 900 kg de CO₂ por metro cúbico de madera (Beyer et al. 2011), su consideración en el cálculo reduciría significativamente la huella de carbono del producto.

Las operaciones forestales implican el traslado de maquinaria desde el centro de operaciones hasta el bosque. Por lo tanto, se asumió que las máquinas se trasladan para trabajar en 10 ha.

6.1 Cálculo del impacto de los bienes de capital

Las emisiones asociadas a los bienes de capital se incluyeron en la estimación. Por lo tanto los límites del sistema son de tercer orden (Goedkoop et al. 2010). Se utilizaron dos formas de estimación: 1) para la maquinaria agrícola y forestal se calcula la fracción de la masa del equipo necesaria para generar una unidad funcional de producto (Ec. 1); 2) para las instalaciones industriales se computa la fracción de la instalación necesaria para producir una unidad funcional (Ec. 2).

$$\text{frac}_1 = \frac{m}{\text{VUE} \cdot p} \quad \text{Ecuación 1}$$

dónde frac_1 (kg) es la fracción de la masa del equipo necesaria para producir una unidad funcional (m³); m es la masa del equipo (kg); VUE es la vida útil del equipo (h); p es la productividad del equipo necesaria para producir una unidad funcional (hah⁻¹ o m³h⁻¹).

$$\text{frac}_2 = \frac{1}{\text{VUI} \cdot op} \quad \text{Ecuación 2}$$

dónde frac_2 (sin unidades) es la fracción de la instalación necesaria para producir una unidad funcional (m³); VUI es la vida útil de la instalación (año); op es el volumen de producción anual de la instalación (m³).

6.2 Productos de eucalipto

Se consideró un único producto de eucalipto, la troza con destino a la fabricación de celulosa. El proceso de producción de una unidad de volumen de troza de eucalipto se descompuso en un inventario de entradas y salidas (Tabla 1). No se consideró el impacto de la construcción de caminos forestales, ya que no se contaba con información local sobre este aspecto².

Tabla 1. Tabla de entrada y salidas para el inventario de la huella de carbono de trozas de *E. grandis*.

Salida	Unidad	Entradas	Referencias
Producción de plantas de <i>E. grandis</i>	un.	Agua para irrigación Electricidad para iluminación y bombeo Fertilizante Combustible para calefacción Combustible para transporte dentro de las instalaciones Transporte de las plantas hasta la plantación (100 km)	(Vázquez et al. 2012)
Preparación del terreno (<i>E. grandis</i>)	ha	Laboreo primario y secundario Aplicación de herbicida e insecticida Combustible Herbicida Insecticida Transporte de maquinaria (100 km)	(Vázquez et al. 2012)
Plantación (<i>E. grandis</i>)	ha	Maquinaria para plantación Plantación y aplicación de fertilizante Combustible Fertilizante Transporte de maquinaria (100 km)	(Vázquez et al. 2012)
Post-plantación (<i>E. grandis</i>)	ha	Aplicación de fertilizante y herbicida Herbicida Insecticida Transporte de maquinaria (100 km)	(Vázquez et al. 2012)
Cosecha (<i>E. grandis</i>)	ha	Harvester Forwarder Combustible Transporte de maquinaria (100 km)	(Klepac and Rummer 2012; UPM and Forestal Oriental 2010; Vázquez et al. 2012)
Troza <i>E. grandis</i>	m ³	Producción de plantas Preparación del terreno Plantación Post-plantación Cosecha Volumen a extraer Cargador frontal para carga de trozas Transporte de cargador frontal (100 km) Transporte de trozas hasta planta industrial (100 km)	(Klepac and Rummer 2012; UPM and Forestal Oriental 2010; Vázquez et al. 2012)

² McCallum (2009) reporta para una empresa neozelandesa una participación del 8% en la huella de carbono de las trozas de pino radiata. (McCallum 2009)

6.3 Productos de pino

El inventario para la producción de plantas, la preparación del terreno, la plantación y la post-plantación de pino fue tomado del inventario obtenido para *E. grandis*. Se asumió que los procesos son similares para ambas especies. Al igual que en el caso anterior, no se consideró el impacto de la construcción de caminos forestales. El proceso de producción de una unidad de volumen de troza de pino con destino a la transformación mecánica se descompuso en un inventario de entradas y salidas (Tabla 2).

Tabla 2. Tabla de entradas y salidas para el inventario de la huella de carbono de trozas de *P. taeda*.

Salidas	Unidad	Entradas	Referencias
Raleo no comercial	ha	Operación con motosierra	INIA 2013
Raleo (10 años)	ha	Harvester Forwarder Combustible Transporte de maquinaria (100 km)	(Bussoni and Cabris 2010; Francescato et al. 2008; Klepac and Rummer 2012)
Raleo (15 años)	ha	Harvester Forwarder Combustible Transporte de maquinaria (100 km)	(Bussoni and Cabris 2010; Francescato et al. 2008; Klepac and Rummer 2012)
Tala rasa (24 años)	ha	Harvester Forwarder Combustible Transporte de maquinaria (100 km)	(Bussoni and Cabris 2010; Francescato et al. 2008; Klepac and Rummer 2012)
Troza <i>P. taeda</i>	m ³	Producción de plantas (<i>E. grandis</i>) Preparación del terreno (<i>E. grandis</i>) Plantación (<i>E. grandis</i>) Post-plantación (<i>E. grandis</i>) Raleo no comercial Raleo 10 años Raleo 15 años Tala rasa Volumen a extraer Cargador frontal para carga de trozas Transporte de cargador frontal (100 km) Transporte de trozas hasta planta industrial (100 km)	(Bussoni and Cabris 2010; Francescato et al. 2008; Klepac and Rummer 2012)

6.4 Descripción del proceso industrial de madera de pino

Para la madera de pino, dado que se contaba con información disponible, además de las bases de datos en el software *SimaPro* (PRÉ Consultants, Países Bajos), se realizó el cálculo de la huella de carbono considerando una transformación mecánica hipotética habitual en las condiciones de Uruguay. Se trata de una fábrica que procesa madera de pino (*P. taeda*) mediante aserrado, secado y cepillado. Los subproductos tienen dos destinos: 1) la incineración para generar vapor y obtener la energía necesaria para secar la madera; y 2) la venta del excedente en el mercado local (Tabla 3).

Tabla 3. Hipotética planta industrial utilizada para modelar la huella de carbono de los productos industriales de madera de pino

Descripción planta industrial	Magnitud	Unidad
Distancia media al bosque	100	km
Distancia a los compradores de subproductos (chips, aserrín, viruta)	100	km
Distancia al puerto	400	km
Capacidad de aserrado	50.000	m ³ año ⁻¹
Vida útil aserradero	50	año
Energía de aserrado	6	kWhm ⁻³
Factor de recuperación lineal	50	%
Chips y aserrín (producción vapor)	14.048	t
Chips y aserrín (venta)	30.452	t
Capacidad de secado	660	m ³
Producción secado	48.470	m ³ año ⁻¹
Ciclos de secado	85	ciclos.año ⁻¹
Vida útil planta secado	10	año
Energía térmica de secado	422	kWhm ⁻³
Energía eléctrica de secado	112	kWhm ⁻³
Capacidad de cepillado	25.000	m ³ año ⁻¹
Vida útil planta de cepillado	30	año
Energía de cepillado	5	kWhm ⁻³

Se consideró un proceso industrial que incluye los siguientes productos: tablas aserradas, tablas secas a un contenido de humedad de 12% y tablas cepilladas dos caras. Como subproductos, se obtienen chip, aserrín, tablas dañadas durante el secado y viruta del cepillado. La corteza de pino no fue considerada en este análisis, dado el escaso volumen que representa en el total de los subproductos (Li et al. 2006).

Todo el impacto ambiental se asignó a los productos, y no a los subproductos. Este abordaje fue utilizado por otros autores que estudiaron el LCA de productos de madera de coníferas Jungmeier et al. (2002), citado por Milota et al. (2005). La consecuencia de asignar todas las emisiones a los productos es una huella de carbono más alta por producto. Sin embargo, ya que existen diversas formas de asignar las emisiones a los subproductos (precio, volumen, etc.), se consideró que en este análisis la asignación de emisiones se realizaría exclusivamente en el producto principal.

Se asumió que tanto el bosque como el comprador de subproductos se encuentran a 100 km de la planta y que las trozas se transportan por camión. Ambas suposiciones reflejan situaciones habituales en la producción local. También es una distancia que se utiliza en estudios similares realizados en la región (González et al. 2011; Milota et al. 2005).

Se asumió que la energía de la maquinaria industrial fija, tales como equipos de aserrado, secado y cepillado, es eléctrica. Para este análisis se supuso que la energía eléctrica es generada a partir de la combustión de residuos de un aserradero de pino, basada en información de una planta industrial del Norteamérica, *Electricity, onsite boiler, softwood mill average/RNA (SimaPro, USLCI)*.

6.4.1 Aserrado

Se consideró que la madera de pino se procesa en un aserradero con una capacidad de producción de 50.000 m³ de tablas por año. Para el cálculo de las emisiones generadas por la fabricación, transporte e instalación del aserradero, se utilizó la planta de aserrado *Sawmill/RER/IS (SimaPro, Ecoinvent unit process)*. Se supuso que la producción de tablas tiene un factor de recuperación lineal (FRL), definido como el cociente entre el volumen de tablas sobre el volumen de trozas, de 50%. A partir de ese FRL se estima que por cada unidad de volumen de tablas aserradas se generan 675 kg de chips y 215 kg de aserrín (Li et al. 2006). La energía necesaria para aserrar se estima en 6,3 kWhm⁻³ de tablas (Li et al. 2006).

6.4.2 Secado

Se consideró una capacidad de secado anual de aproximadamente 48.470 m³ de madera fresca de 40 mm de espesor secada a 12% de contenido de humedad (en base seca). Se calculó una capacidad instalada de 660 m³ de cámaras de secado con 85 ciclos de 4 días por año. Para la estimación de las emisiones de la infraestructura de secado se consideró la unidad de cámara de secado *Technical wood drying, infrastructure/RER/IS (SimaPro, Ecoinvent unit process)*. El proceso de secado consume fundamentalmente energía para dos procesos, la circulación de aire en las cámaras de secado y el calor necesario para evaporar el agua de la madera, estimados en 100 kWhm⁻³ y 422 kWhm⁻³ (Li et al. 2006), respectivamente. Ambos requerimientos energéticos están estimados independientemente del espesor de las tablas. Luego del secado, se consideró una contracción de 7% en el ancho y 4% en el espesor (Forest Products Laboratory 2010). Además, se estimó una pérdida de madera dañada por secado del 5% del volumen.

6.4.3 Cepillado dos caras

Se consideró que las tablas secas de pino se cepillan dos caras (S2S), retirando 1,5 mm de cada cara. La fábrica modelada cepilla aproximadamente el 50% de la producción. El impacto ambiental en emisiones de gases de efecto invernadero de la planta de cepillado se estimó a partir de una hipotética planta de cepillado, *Planing mil/RER/IS (SimaPro, Ecoinvent unit process)*. Se consideró un consumo de energía eléctrica de 5,1 kWhm⁻³ de una planta de cepillado de madera seca de EEUU (*SimaPro, USLCI*). Como subproducto, para cada metro cúbico de tabla cepillada S2S se obtienen 30,4 kg de viruta seca.

6.4.4 Cálculo de la producción de energía a partir de subproductos de la industria de la madera

La fabricación de productos de madera genera subproductos que a su vez pueden ser utilizados para la generación de energía: chips, aserrín, tablas dañadas por el secado y viruta. Se consideró que estos subproductos son consumidos como combustible en una caldera de vapor para la generación de calor. La mezcla de chips, aserrín y viruta seca tiene un contenido de humedad de 57%, obtenido como la media ponderada del contenido de humedad del chip,

el aserrín y la viruta. La mezcla tendrá un poder calorífico de $1,82 \text{ kWhkg}^{-1}$ y la eficiencia del proceso del equipo está estimada en 80% (Francescato et al. 2008).

El consumo de calor está determinado por el secado, que requiere 422 kWhm^{-3} , independientemente del espesor de las tablas (Li et al. 2006). Si se considera que la planta produce 44.500 m^3 de madera seca al año, se requieren aproximadamente 20.500 MWh de calor. Para generarlos se consumen aproximadamente 14.000 t de la mezcla de chips, aserrín y viruta en un generador de vapor de 3.200 kW de potencia³, con una eficiencia de 80%. La hipotética planta de transformación mecánica genera aproximadamente 50.000 t de subproductos al año, fundamentalmente chips y aserrín, de los cuales consume 14.000 t para abastecer las necesidades de calor del secado. Este estudio asumió que la diferencia se vende al mercado interno, ya sea para producción de energía o de otros productos de la madera (tableros, pellet, briquetas, etc.).

Se consideró que la energía térmica obtenida por la combustión de 290 kg de residuos por m^3 de tablas, evita que se consuma electricidad para el mismo fin, 422 kWhm^{-3} . Por lo tanto, el uso de los residuos para producir energía disminuye el impacto de la huella de carbono.

³ En el cálculo de huella de carbono, el impacto ambiental de la fabricación, instalación y transporte de la caldera de vapor se consideró para un equipo de 1000 kW, ya que las bases de datos del software no registraban un equipo de mayor potencia.

7 Resultados y discusión

7.1 Utilización del *SimaPro* como herramienta para el cálculo de la huella de carbono

Existen numerosos programas para el análisis de ciclo de vida que pueden calcular la huella de carbono: *SimaPro* (PRé Consultants, Países Bajos), *GaBi* (PE International, Alemania), *Regis* (Sinum, Suiza), *Umberto* (IFU Hamburg, Alemania). También existe software libre de código abierto con funciones similares: *OpenLCA* (GreenDelta, Alemania) y *BrightwayLCA* (C. Mutel, Suiza). Para este estudio se utilizó el programa *SimaPro* (PRé Consultants, Países Bajos), ya que estaba disponible en el Instituto de Investigación Agropecuaria (INIA).

El cálculo de la huella de carbono es el producto de la actividad humana por un factor de emisión: cada unidad de actividad se multiplica por un factor que permite la conversión de materiales, energía, transporte, procesos y escenarios de disposición final de desechos en masa de anhídrido carbónico equivalente. Obtener los factores de emisión para cada ítem es un proceso engorroso, ya que requiere investigación que lo respalde. Por ejemplo, el cálculo de la huella de carbono de una planta de aserrado implica la consideración de las máquinas para la producción objetivo, su fabricación, traslado, e instalación, teniendo en cuenta la provisión de energía y los desechos finales. Cada uno de estos puntos genera una huella de carbono que es necesario estimar. Contar con la información disponible en las bases de datos de los programas para el análisis de ciclo de vida de productos, simplifica enormemente las estimaciones del tipo que presenta este informe. Por supuesto, el cálculo será más preciso cuanto más ajustados estén los factores de emisión. Sin embargo, en un primer análisis, la utilización del *SimaPro* (PRé Consultants, Países Bajos) permite acceder a un resultado rápido y verificable: los métodos de cálculo y la información están disponibles en el programa. Otros analistas podrían reproducir el cálculo, y así verificar los resultados, con relativa sencillez.

Asimismo, la utilización de *SimaPro* (PRé Consultants, Países Bajos) permite ordenar la información y la secuencia de resultados. En productos fabricados al final de un proceso, tales como las tablas cepilladas, el software monitorea la secuencia del proceso, calibrando la eficiencia del mismo (Figuras 1 y 2).

Otra ventaja de la utilización de *SimaPro* (PRé Consultants, Países Bajos) es que es posible obtener resultados del análisis del impacto ambiental utilizando metodologías establecidas. La metodología a utilizar depende de los objetivos propuestos en el análisis. Algunos ejemplos de metodologías disponibles son los siguientes: IPCC 2007 Potencial de Calentamiento Global (GWP) a 100 años, Eco-indicator 99, EPS 2000, etc. La medición de impacto ambiental puede considerar categorías de impacto como el cambio climático (huella de carbono), efectos tóxicos en humanos y en el ecosistema, agotamiento de minerales, etc. (Goedkoop et al. 2010).

El principal inconveniente de la utilización de *SimaPro* (PRé Consultants, Países Bajos) es que la información para la configuración de las tablas se obtiene de investigación de la realidad

productiva de Europa o EEUU. Esto también es así para gran parte de la información disponible en la literatura, sencillamente porque son esas regiones las que concentran la investigación en el tema. Por ejemplo, la huella de carbono para la fabricación y el uso de un cargador frontal será probablemente similar en EEUU y en Uruguay, dado que Uruguay importa este tipo de equipos. Sin embargo, la huella de carbono de la generación de energía eléctrica sí será distinta para ambos países, ya que la matriz energética es diferente. Por lo tanto, en acuerdo con otros trabajos sobre el tema generados en Uruguay (Oyhantcabal 2012), este informe destaca la necesidad de generar investigación local que permita ajustar la información disponible para el cálculo de la huella de carbono. Estudios de cálculo de huella de carbono como éste permiten identificar cuáles son aquellos puntos que por ser relevantes, requieren investigación local. A continuación se presenta una síntesis de las ventajas y desventajas de la utilización del software *SimaPro* (PRé Consultants, Países Bajos) para el cálculo de huella de carbono (Tabla 4).

Tabla 4. Ventajas y desventajas de la utilización de *SimaPro* (PRé Consultants, Países Bajos).

Ventajas	Desventajas
Información disponible en tablas referenciadas	Información basada en investigación europea y norteamericana
Sistematización de la información	Coefficientes de conversión ya incorporados
Visualización sencilla de los resultados	Dependencia de un software que no está libremente disponible
Análisis de impacto ambiental a través de metodologías establecidas	
Resultados rápidos, reproducibles y verificables	

Este informe recomienda la utilización de programas, tales como *SimaPro* (PRé Consultants, Países Bajos) o similares, para el cálculo de la huella de carbono de productos, principalmente porque permiten la utilización de información referenciada y disponible, lo que hace que el cálculo sea reproducible.

7.2 Cálculo de la huella de carbono

7.2.1 Trozas de eucalipto y pino

Los resultados del cálculo de la huella de carbono de trozas son similares para eucalipto y pino, 28,1 y 28,6 kg CO₂ eq m⁻³, respectivamente. Los resultados son comparables a los presentados por una empresa neozelandesa, Nelson Forests Ltda., para trozas de pino, 18 kgCO₂ eq m⁻³ (McCallum 2009). También es comparable a la huella de carbono de trozas de castaño (*Castanea sativa*) en Asturias, norte de España, 9,46 kg CO₂ eq m⁻³ (Martínez Alonso et al. 2012). En este último caso se trata de bosques naturales de castaño, y la madera se procesa en una planta industrial ubicada a menos de 100 km de distancia de los bosques. Asimismo, también es similar a valores de huella de carbono reportados por Fuchigami et al. (2012) para trozas de madera en Japón, 37 kg CO₂ eq m⁻³ (Fuchigami et al. 2012).

Tanto para eucalipto como para pino, el factor más relevante en la estimación de la huella de carbono es el transporte, representando valores cercanos al 80%. La otra actividad que presenta una huella de carbono considerable es la extracción forestal (raleos y cosecha). En el caso del eucalipto, esta ocurre una única vez, y comprende la cosecha de todo el rodal, lo que implica una huella de carbono de 3,1 kg CO₂ eq m⁻³. En la producción de pino hay tres extracciones, dos raleos y la cosecha final, con una huella de carbono de 3,8 kg CO₂ eq m⁻³. Estos valores de huella de carbono son similares a los presentados por Berg (1997) (Tabla 5 y Figura 2).

Tabla 5. Cálculo de huella de carbono de trozas puestas en planta.

Salida	Huella de carbono kg CO ₂ eq m ⁻³	Entrada	Un.	Magnitud	Huella de carbono kg CO ₂ eq m ⁻³	%
Trozas de eucalipto (m ³)	28,1	Producción de plantas	un.	1100,0	0,2	0,7
		Preparación del terreno	ha	1,0	0,4	1,4
		Plantación	ha	1,0	1,6	5,7
		Post-plantación	ha	1,0	0,3	1,1
		Tala rasa (10 años)	ha	1,0	3,1	11,0
		Transporte de maquinaria	tkm	0,9	0,2	0,7
		Transporte a la planta	tkm	100,0	22,3	79,4
		Trozas de pino (m ³)	28,6	Producción de plantas	un.	1100
Preparación del terreno	ha			1,0	0,4	1,4
Plantación	ha			1,0	1,5	5,2
Post-plantación	ha			1,0	0,2	0,7
Raleo comercial (10 años)	ha			1,0	0,8	2,8
Raleo comercial (15 años)	ha			1,0	1,4	4,9
Tala rasa (24 años)	ha			1,0	1,6	5,6
Transporte de maquinaria	tkm			0,9	0,2	0,7
Transporte a la planta	tkm			100,0	22,3	78,0

En Uruguay, los árboles de eucalipto para la fabricación de pulpa de celulosa son cosechados a partir de los 8 años (UPM and Forestal Oriental 2010). Este informe consideró para estos

rodales un ciclo de producción de 10 años. A su vez, los árboles de pino para transformación mecánica requieren un turno forestal de 24 años (Bussoni and Cabris 2010).

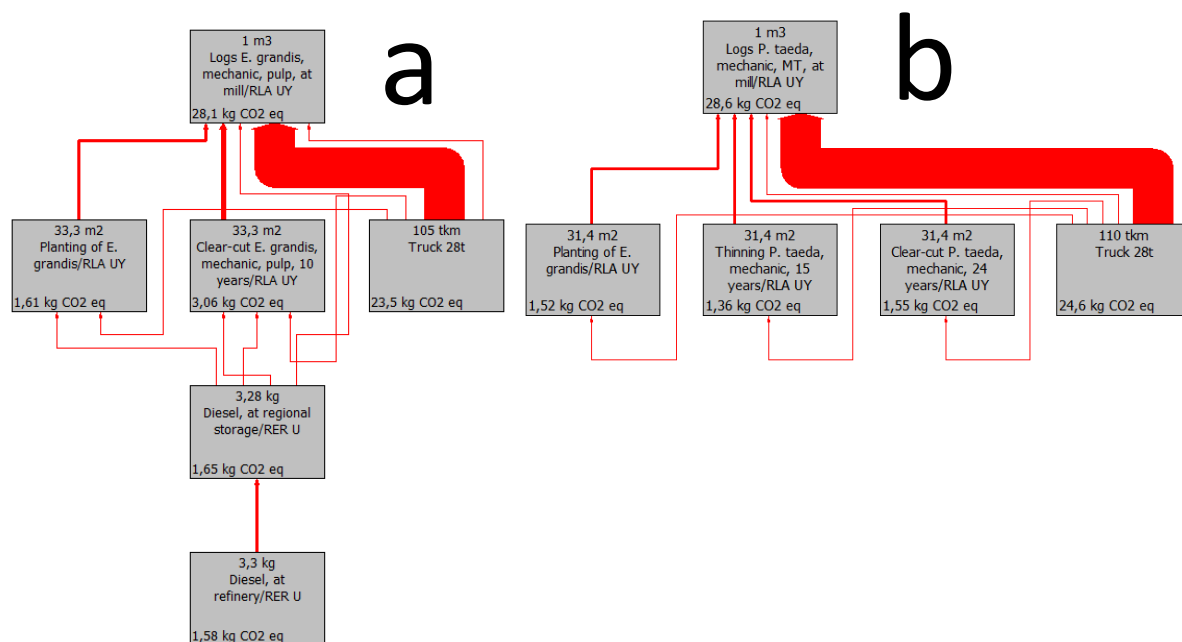


Figura 2. Huella de carbono de trozas de eucalipto (a) y de pino (b).

En un estudio más detallado se podría recopilar más y mejor información sobre el proceso forestal de pino, y así hacer un cálculo de la huella de carbono de procesos tales como la producción de plantas, la preparación del terreno, la plantación y la post-plantación. Sin embargo, el estudio detallado obtenido para eucalipto permite estimar que el impacto en la huella de carbono total en las trozas es bajo.

7.2.2 Productos de madera de pino

La producción de productos de madera puestos en planta presenta una huella de carbono para tablas aserradas, tablas secas a un contenido de humedad de 12% y tablas secas y cepilladas de 70, 95 y 119 kg CO₂ eq m⁻³ (Tabla 5). Los resultados son comparables a los publicados por una empresa neozelandesa, Nelson Forests Ltda., que para productos similares presentaba una huella de carbono que oscilaba entre 27 y 148 kgCO₂ eq m⁻³ (McCallum 2009). Los resultados de madera aserrada, seca y cepillada son similares a la información reportada para madera de Japón, 197 kgCO₂ eq m⁻³ (Fuchigami et al. 2012). Para igual producto fabricado en el oeste y sur de EEUU se obtuvieron 72 y 47 kgCO₂ eq m⁻³, respectivamente, sin considerar el transporte de trozas (Milota et al. 2005).

Para los productos industrializados puestos en planta el mayor impacto está en la etapa primaria. El análisis consideró una distancia del bosque a la planta de 100 km, lo que seguramente amplifica el impacto de la etapa primaria. A medida que aumenta la industrialización, el impacto de las trozas en el producto final disminuye: para las tablas aserradas, las tablas secas y las tablas cepilladas representa 77%; 71%; y 67%; respectivamente (Tabla 6 y Figura 3).

La utilización de subproductos para la generación de calor en forma de vapor reduce el impacto de la huella de carbono. Sin embargo, dado que el proceso productivo modelado consideró que solamente se utiliza un tercio de los subproductos del aserrío con este fin, la reducción de la huella de carbono por las emisiones evitadas para tablas aserradas, tablas secas y tablas cepilladas es 4,3 CO₂ eq m⁻³; 5,4 CO₂ eq m⁻³; y 6,9 CO₂ eq m⁻³, respectivamente. Este estudio asume que la planta genera el vapor para secar la madera que produce, y que el resto se vende como materia prima para la fabricación de tableros o como combustible. Es una presunción que se refleja habitualmente en la realidad productiva local (Tabla 6 y Figura 3).

Tabla 6. Cálculo de huella de carbono de productos de madera de pino puestos en planta.

Salida	Huella de carbono	Entrada	Un.	Magnitud	Huella de carbono	
	kg CO ₂ eq m ⁻³				kg CO ₂ eq m ⁻³	
Tablas aserradas (m ³)	70	Trozos de pino	m ³	2,0	57,1	77,0
		Transporte chips y aserrín	tkm	60,9	13,6	18,3
		Planta de aserrado	un.	4,0x10 ⁻⁷	3,2	4,3
		Electricidad	kWh	6,3	0,3	0,4
		Emisiones evitadas (chips y aserrín como combustible)	kg	281,0	-4,3	
Tablas secas (m ³)	95	Trozos de pino	m ³	2,4	67,4	70,9
		Tablas aserradas	m ³	1,2	15,2	16,0
		Planta de secado	un.	5,6x10 ⁻⁵	0,6	0,6
		Electricidad	kWh	112,4	5,4	5,7
		Calor (combustión biomasa)	kWh	422,0	6,8	7,2
		Emisiones evitadas (tablas dañadas por secado como combustible)	kg	19,0	-0,3	
Tablas cepilladas dos caras (m ³)	119	Trozos de pino	m ³	2,8	79,2	66,6
		Tablas aserradas	m ³	1,4	17,9	15,0
		Tablas secas	m ³	1,1	11,9	10,0
		Planta de cepillado	un.	1,3x10 ⁻⁶	7,7	8,4
		Electricidad	kWh	5,1	0,3	0,3
		Emisiones evitadas (viruta como combustible)	kg	30,4	-0,6	

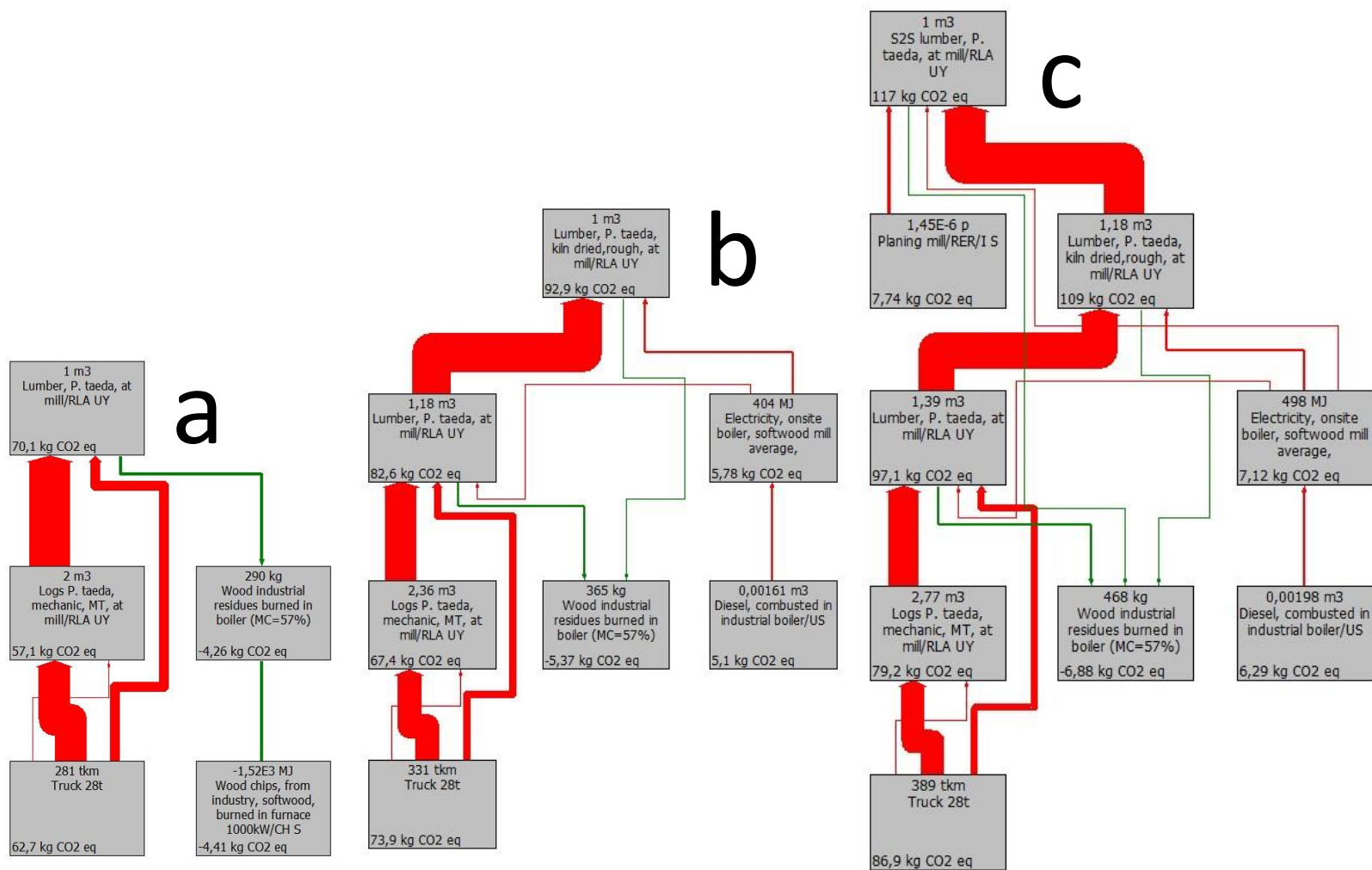


Figura 3. Huella de carbono de productos forestales de pino puestos en planta: tabla aserrada (a); tabla seca (b); y tabla cepillada dos caras (c).

8 Análisis de sensibilidad

A los efectos del cálculo se consideró para las trozas de ambas especies estudiadas, eucalipto y pino, una distancia entre bosque y la planta de 100 km. Dado que este aspecto no necesariamente refleja la realidad, se estimó la huella de carbono de las trozas considerando distancias variables entre el bosque y la planta industrial, con una distancia máxima de 400 km (Tabla 7).

Tabla 7. Efecto de la distancia en la huella de carbono de las trozas

Huella de carbono (kg CO ₂ eq m ⁻³)	Distancia (km)					
	20	50	100	200	300	400
Producto						
Trozas de eucalipto	10	17	28	51	73	96
Trozas de pino	11	17	29	51	74	96

Dado el impacto que tiene el transporte en la cadena productiva de la madera se realizó el cálculo del transporte de productos desde la planta industrial hasta el puerto considerando 400 km de distancia. Se realizó un análisis de sensibilidad que consideró la sustitución del transporte carretero por el transporte ferroviario. Para ello, se supuso un tren de transporte de cargas de tracción con motor diésel de EEUU (*SimaPro, Ecoinvent unit process*). Se observa que la utilización del transporte ferroviario disminuye hasta en un 73% la huella de carbono. Para las tablas secas y cepilladas la reducción es menor, ya que se transporta menos masa por unidad de volumen, aunque aún es significativa (Tabla 8).

Tabla 8. Efecto de la distancia al puerto en la huella de carbono para los productos forestales.

Huella de carbono (kg CO ₂ eq m ⁻³)	Distancia al puerto (400 km)	
	Camión	Tren
Trozas de eucalipto	95	26
Trozas de pino	96	26
Tablas aserradas (<i>P. taeda</i>)	149	88
Tablas secas (<i>P. taeda</i>)	133	102
Tablas cepilladas dos caras (<i>P. taeda</i>)	156	126

La eficiencia de aserrado es un factor productivo relacionado con la utilización de tecnología de aserrado. A materia prima de igual especie y geometría, el cociente entre el volumen de tablas producidas sobre el volumen de trozas procesadas debería ser similar, con relativa independencia de la planta de aserrado. Tanto es así, que para cálculos estándar es común considerar un factor de recuperación lineal (FRL) de 50%. Sin embargo, un proceso de aserrado de bajo nivel técnico (esquemas de corte mal seleccionados, sierras desafiladas, plantas de aserrados con flujos de madera tortuosos, etc.) puede generar FRL significativamente menores a 50%. Este estudio estimó que en la tabla aserrada aumentar la eficiencia de aserrado de 35 a 50% implica una reducción en la huella de carbono de 38%. Asimismo, el efecto se arrastra a los productos siguientes que toman a la tabla aserrada como un insumo (Tabla 9).

Tabla 9. Efecto de la eficiencia del aserrado en la huella de carbono de productos de madera de pino puestos en planta

Huella de carbono (kg CO ₂ eq m ⁻³)	Factor de recuperación lineal (%)		
	35	40	50
Producto			
Madera aserrada	112	94	70
Madera aserrada y seca	142	121	95
Madera aserrada, seca y cepillada dos caras	174	150	119

9 Identificar necesidades y oportunidades para la industria maderera local

La implementación del cálculo de huella de carbono en las empresas locales permitiría alcanzar los siguientes objetivos:

1. Estimar la eficiencia de los procesos productivos.
2. Comparar los procesos productivos utilizando una referencia común.
3. Evaluar el impacto de la huella de carbono en los distintos procedimientos.

Los dos primeros objetivos son especialmente útiles en una industria como la de transformación mecánica de madera en Uruguay, aún en pleno desarrollo y abocada a procesos similares. Asimismo, la difusión de este tipo de cálculo permitiría encontrar fortalezas y debilidades del procesamiento industrial de la madera, especialmente en la comparación con materiales utilizables en aplicaciones similares (Beyer et al. 2011; Gobierno Vasco 2009). Con este criterio, en Brasil existen compañías dedicadas a la fabricación de celulosa y papel que también miden su huella de carbono (Pappendieck 2010).

A partir de este informe preliminar se advierte la importancia del transporte, especialmente al considerar productos que se exportan por vía marítima, y que, por lo tanto, deben trasladar sus productos hasta Montevideo. Las plantaciones y las industrias de transformación mecánica están alejadas del puerto. Por lo tanto, la producción debe ser eficiente para poder absorber ese obstáculo. Esto es claro cuando se compara la producción a diferentes factores de recuperación lineal. Producir tablas cepilladas con un FRL de 35%, sin considerar las emisiones por el transporte, tiene una huella de carbono de 174 kg CO₂ eq m⁻³. En tanto producir las mismas tablas cepilladas con un FRL de 50%, incluyendo las emisiones de transportar el producto 400 km de distancia, genera una huella de carbono de 156 kg CO₂ eq m⁻³. Esta comparación evidencia la importancia de la eficiencia en el proceso de aserrado (Tablas 7 y 9).

El cálculo permite distinguir los aspectos del proceso que son controlables de los que no lo son. Por ejemplo, el consumo de energía térmica necesaria para secar madera difícilmente pueda reducirse, pero la cantidad de fertilizante que se aplica en la plantación, la eficiencia del aserrado o el entrenamiento de los choferes de los camiones que transportan la madera sí son pasibles de mejora.

Considerando el último objetivo, la evaluación de la huella de carbono permitirá a las organizaciones posicionarse frente a un aspecto de la producción de bienes o servicios que adquiere cada vez más importancia. Lo que ahora es un dato interesante sobre la producción puede transformarse en un requerimiento comercial. La oportunidad de ser proactivo en este aspecto es valiosa.

Dada la especificidad del cálculo de huella de carbono para productos y servicios, este estudio recomienda que los esfuerzos del Consejo Sectorial Forestal-Madera se concentren en dos niveles de actuación distintos:

1. cálculo de huella de carbono sectorial para productos característicos.
2. promover que las empresas/organizaciones realicen el cálculo de la huella de carbono de sus productos.

El primer nivel debe estar a cargo de las instituciones públicas y el segundo depende de cada organización. Sin el involucramiento directo de las empresas integrantes del Consejo difícilmente pueda calcularse una huella de carbono relevante para todo el sector.

10 Referencias

- Berg S (1997) Some aspects of LCA in the analysis of forestry operations. *J Cleaner Products* 5:211–217.
- Beyer G, Defays M, Fischer M, et al. (2011) Frente al cambio climático: utiliza madera. 86 p.
- Bussoni A, Cabris J (2010) A financial evaluation of two contrasting silvicultural systems applicable to *Pinus taeda* grown in north-east Uruguay. *Southern Forests* 72:163–171.
- Carrasco-Letelier L, Vázquez D, D’Ottone F, et al. (2013) Balance energético de las cadenas agroindustriales. *Revista INIA* 32:46–50.
- Cobut A, Beauregard R, Blanchet P (2013) Using life cycle thinking to analyze environmental labeling: the case of appearance wood products. *Int J Life Cycle Assess* 18:722–742.
- Forest Products Laboratory (2010) *Wood Handbook - Wood as Engineering Material*. USDA - FPL, Madison
- Francescato V, Antonini E, Bergomi L (2008) *Wood Fuels Handbook - Production - Quality requirements - Trading*. AIEL - Italian Agriforestry Energy Association
- Fuchigami Y, Kojiro K, Furuta Y (2012) Calculation of CFP and verification of effect on CO2 emission reduction for the use of certified wood in Kyoto Prefecture. *J Wood Science* 58:352–362.
- Gobierno Vasco (2009) *Madera y cambio climático. Análisis del ciclo de vida de la madera como material alternativo*. 128 p.
- Goedkoop M, De Schryver A, Oele M, et al. (2010) *Introduction to LCA with SimaPro 7*. 86.
- González P, Vega M, Zaror C (2011) *Life Cycle Inventory of Pine and Eucalyptus Cellulose Production in Chile: Effect of Process Modifications. Towards Life Cycle Sustainability Management*
- Klepac J, Rummer B (2012) *Off-road transport of Pinyon/Juniper*. New Bern, USA, p 12
- Li J, McCurdy M, Pang S (2006) Energy demand in wood processing plants. *New Zealand Journal of Forestry Science* 51:13–18.
- Martínez Alonso C, Berdasco L, González L, Martínez S (2012) Huella de carbono de un producto de madera de castaño (proyecto piloto en Asturias). *Progreso Forestal* 29:35–40.
- McCallum D (2009) *Carbon Footprint Nelson Forests Ltd*. 25 p.
- Milota M, West C, Hartley I (2005) Gate-to-gate life-cycle inventory of softwood lumber production. *Wood and Fiber Science* 37:47–57.
- Oyhantcabal W (2012) *Mediciones de gases de efecto invernadero en el sector agropecuario uruguayo*.

Papendieck S (2010) La huella de carbono como nuevo estándar ambiental en el comercio internacional de agroalimentos. 82 p.

UPM, Forestal Oriental (2010) Informe de Responsabilidad Social y Ambiental 2010. UPM, Forestal Oriental

Vázquez D, Carrasco-Letelier L, D'Ottone F, et al. (2012) Evaluating the sustainability of potential agro-industrial chains (sweet sorghum, grain sorghum, sweet potato and forestry) for agroenergy production. 15 p.