



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-536

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Análisis de ciclo de vida del uso térmico de astillas de madera delgada procedente de claras: estudio de caso en el centro logístico de Lozoyuela (Madrid).

TOLOSANA, E.¹, LAINA, R.¹ y MARTÍN SAN ROMÁN, A.¹

¹ E.T.S.I. de Montes, Forestal y del Medio Natural. Universidad Politécnica de Madrid. eduardo.tolosana@upm.es

Resumen

Se ha realizado un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) del uso de biomasa forestal (madera delgada de pino) para la producción de energía térmica previo astillado en la planta de Lozoyuela (Madrid), estudiando el ciclo completo desde el aprovechamiento hasta el consumo final de energía calorífica y considerando la fabricación de los bienes de equipo empleados en las diferentes fases, mediante el software SimaPro en aplicación de la metodología ReCiPe 2008. Se consideraron las categorías de impacto cambio climático, agotamiento del ozono, acidificación terrestre, eutrofización de agua dulce y marina, toxicidad humana, oxidantes fotoquímicos, partículas en suspensión, ecotoxicidad terrestre, de agua dulce y marina, radiación ionizante y transformación de suelo natural. La unidad funcional escogida fue el MWh térmico a disposición del usuario final. Los mayores impactos se deben al uso de energía eléctrica de la red española para alimentar la caldera y distribuir el agua caliente, por lo que se estudió la alternativa de usar energía eléctrica fotovoltaica, reduciéndose sensiblemente la mayor parte de los impactos. También se comparó la cadena actual de producción de calor con biomasa con la alternativa de una caldera de gasóleo de características similares, que aumentaría fuertemente la mayoría de los impactos.

Palabras clave

ACV, biomasa, pino, madera delgada, energía calorífica, bienes de equipo, aprovechamiento.

1. Introducción

De acuerdo con el Instituto de Diversificación y Ahorro Energético (IDAE, 2016), en 2015 el consumo de energía primaria en España (123.866 T.E.P.) provino en un 13,9% de las energías renovables. Un 4,6% del consumo de energía primaria provino de la biomasa - un 33,1% de las renovables, por encima de eólica, solar e hidráulica -. La Especificación Técnica Europea CEN/TS 14588 define la biomasa como "todo material de origen biológico excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización".

La biomasa puede utilizarse para la producción de energía en varias formas, centrándose el presente estudio en un caso de uso térmico, una instalación sencilla formada por una caldera y su circuito de distribución de energía en zonas cercanas al foco de emisión. Este uso no necesita de primas para ser rentable en comparación con los combustibles fósiles, si bien los costes de instalación de calderas de biomasa son más altos que los de gasóleo o gas natural. La biomasa, obtenida de forma sostenible, es un combustible neutro en producción de dióxido de carbono.

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta para medir el impacto ambiental de un producto, proceso o sistema a lo largo de su ciclo de vida (desde que se obtienen las materias primas o insumos iniciales hasta su fin de vida). Recopila y analiza las entradas y salidas del sistema para obtener sus impactos potenciales, con el objeto de definir estrategias para reducirlos. Para poder realizar comparaciones entre los ciclos de vida de sistemas afines es necesario que dichas comparaciones se hagan siguiendo una metodología común, definida en las normas ISO 14040 y 14044, que se seguirán en este trabajo. Un ACV consta de 4 etapas: Definición de objetivos y alcance del estudio, Desarrollo del inventario de ciclo de vida (ICV), Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) e Interpretación del estudio.

El alcance del estudio describe inequívocamente el sistema estudiado, las funciones que realiza, la unidad funcional, los límites del sistema, las suposiciones y los juicios de valor realizados, el criterio para la inclusión de entradas y salidas y para la asignación de cargas, la metodología de la evaluación de impacto de ciclo de vida (EICV) y los tipos de impactos considerados.

Es de especial importancia la unidad funcional, la unidad de producción del sistema estudiado, a la que se referirán los impactos, para su comparación con otros sistemas que originan el mismo producto. Son importantes también los límites del sistema, qué procesos unitarios incluye el ACV. El análisis más sencillo es el primario, que únicamente considera la producción de materiales y transporte. El de segundo orden incluye todos los procesos del ciclo de vida, salvo los bienes de equipo (medios de producción duraderos, como la maquinaria, los medios de transporte o las infraestructuras). El de tercer orden incluye también los bienes de equipo, como mínimo en cuanto al material y transporte empleados para su producción. Numerosos autores consideran muy conveniente la inclusión de estos bienes de equipo o de capital en el análisis, dado que hay diferencias muy relevantes en determinadas categorías de impacto, en función de los procesos considerados (FRISCHKNECHT et al., 2007; BROGAARD & CHRISTENSEN, 2016;).

En numerosos estudios sobre producción de biomasa térmica no se han analizado los bienes de equipo (CASERINI et al., 2010; VALENTE et al., 2011), mientras que en otros se ha analizado con detalle parte de los mismos, como la producción de la caldera, pero no otros componentes, como los materiales y máquinas para el aprovechamiento y transporte de la materia prima (McMANUS, 2010; CESPI et al., 2014; ESTEBAN et al., 2014; PRADA et al., 2015). La consideración de estas fases del ciclo de vida pueden ser trascendentes en los resultados de las fases de aprovechamiento y transporte (HEINIMAN, 2012; PERIC et al., 2016), aunque las fuentes de datos son escasas (BERG, 1997; ATHANASSIADIS et al., 2002; BOSNER et al., 2012) y no están incluidas en las bases de datos más comunes. Un pequeño número de autores han considerado enfoques híbridos o dinámicos para ACV de proyectos bioenergéticos para evaluar la evolución futura de los impactos (PEHNT, 2006; WANG et al., 2012), aunque el análisis global incluyendo todos los bienes de capital para proyectos de producción de energía térmica colectiva con biomasa forestal no se ha llevado a cabo.

2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es analizar los impactos ambientales del uso térmico colectivo de biomasa forestal a partir del estudio de un caso de centro logístico de astillado de madera delgada y distribución de astilla mediante un ACV de tercer grado (incluyendo la producción de todos los bienes de equipo) y considerando como unidad funcional la energía (MWh) a disposición del usuario final. Adicionalmente, se pretende comparar los impactos con 1) los producidos por una caldera equivalente de gasóleo y 2) los producidos por la misma caldera si se utilizara para su alimentación y la distribución de agua caliente a los usuarios energía eléctrica fotovoltaica, en vez de electricidad de la red española con el mix energético de 2014.

3. Metodología

Como base para el análisis, se eligió una instalación de uso térmico colectivo de biomasa forestal, el Centro de Producción y Logística de Biomasa de Lozoyuela, creado por la Asociación de Empresas Forestales (ASEMFO) con financiación del MAGRAMA. Situada en el norte de la Comunidad de Madrid, su área de influencia abarca más de 40 municipios en Madrid, Segovia y Guadalajara. La gestión corresponde hoy a una empresa local con actividad principal ganadera, CEBARMADRID. Utiliza madera delgada de claras y otros tratamientos cercanos, que se astilla, criba y almacena hasta su transporte a los clientes para producción de calor. El residuo o serrín del cribado se usa para cama de

ganado. CEBARMADRID abastecía de astilla a tres clientes: un camping en Gargantilla del Lozoya (17,5% de la producción), el colegio Liceo Europeo de Alcobendas (21%) y la Piscina Municipal de Soto del Real, que consumía el 61,5% de la astilla total, estimada en unas 800 toneladas anuales.

El ACV se realiza de acuerdo a las normas sobre Análisis de Ciclo de Vida ISO 14040 e ISO 14044. Se emplea el software SimaPro 7.3, desarrollado por PRÉ Consultants, para realizar la modelización del inventario del ciclo de vida (ICV) y para analizar los impactos ambientales producidos (EICV). La metodología ReCiPe 2009 Europe H (Midpoint) v1.09 fue la utilizada para calcular los impactos agregados en las categorías ambientales seleccionadas. La unidad funcional seleccionada, con vistas a la comparación entre usos del suelo, fue el MWh térmico a disposición del usuario, es decir, teniendo en cuenta el rendimiento térmico de la caldera y los procesos de distribución de agua caliente hasta las instalaciones en que se usa.

3.1. Descripción del sistema

El sistema estudiado consiste en el aprovechamiento de madera delgada de las claras sobre repoblaciones en que predomina *Pinus sylvestris* L., su transporte al Centro, donde se astilla, seca y criba para obtener una calidad G50 (norma austríaca ÖNORM M7133), almacena y reparte a los clientes, situados a una distancia media de 50 km. El sistema incluye la combustión de la misma para la producción de calor y la distribución a los usuarios finales. Estas fases se reflejan en la Figura 1.

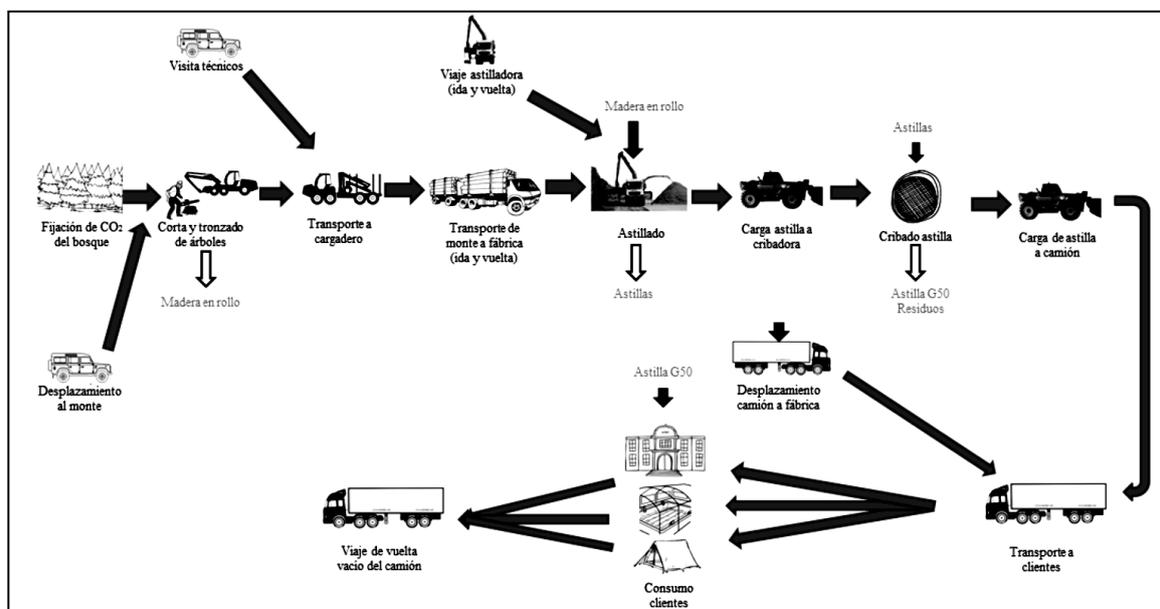


Figura1. Esquema del sistema objeto del ACV.

La unidad funcional seleccionada para este estudio es el megavatio hora (MWh), aunque los datos tomados en campo se refieren a la tonelada verde de astilla. Para la transformación, se ha considerado que la combustión de una t de astilla al 40% de humedad produce 2,8 MWh.

A continuación se enumeran brevemente las suposiciones que se han realizado en la construcción del modelo:

- No se tiene en cuenta los tratamientos previos de las masas, anteriores al propio aprovechamiento.
- Los restos de madera (ramas, puntas) se quedan en el suelo; no se consideran en el estudio.
- Las emisiones de CO₂ en la combustión de la astilla son equivalentes a las fijadas por la masa.

- No se tiene en cuenta el transporte de la cosechadora y el autocargador al monte. Su impacto se considera despreciable porque las distancias son muy pequeñas, por ser su base un pueblo de la zona, y porque una vez que llegan al monte, permanecen allí desde el inicio de la clara hasta el final.
- No se incluye en las entradas la sustancia AdBlue, un aditivo para reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) de los motores diésel, mediante reducción catalítica selectiva (RCA), empleado en el astillado, por no encontrarse en la base de datos del programa SimaPro y no tener gran relevancia cuantitativa sobre el total de las entradas del ciclo de vida.
- Para el estudio del consumo eléctrico de las calderas se han usado sólo los datos del camping de Gargantilla del Lozoya, ya que es el único de los clientes que los recoge de forma detallada.
- Para incluir los bienes de equipo en los cálculos, en algunos casos se han hecho aproximaciones con maquinaria agrícola, debido a que la base de datos de SimaPro no posee mucha información específica sobre maquinaria forestal comparable a la utilizada en el aprovechamiento.
- Las cenizas de la combustión se emplean como fertilizante en las instalaciones en las que se producen, así que no se tiene en cuenta su tratamiento dentro del ACV.

En el caso de las operaciones de monte, la madera obtenida tiene dos destinos, la central de astillado y una fábrica de palés. Se ha seguido para la asignación de impactos un criterio de masa: el 19% del impacto se asigna a la astilla y el 81% restante a la fabricación de palés.

La modelización de los resultados del inventario (ICV) en categorías de impacto de efecto intermedio se realiza con los factores de caracterización y unidades de la Tabla 1. Más información sobre la metodología ReCiPe 2009 se puede encontrar en GOEDKOOOP et al. (2009).

Tabla 1. Categorías de impacto consideradas, factores de caracterización y unidades, de acuerdo con la metodología ReCiPe 2009 Europe H (Midpoint) v1.09

Categoría de impacto	Factor de caracterización	Unidad
Cambio climático	Cambio climático potencial	kg CO ₂ eq (aire)
Agotamiento del ozono	Agotamiento potencial del ozono	kg CFC-11 eq (aire)
Acidificación terrestre	Acidificación potencial terrestre	kg SO ₂ eq (aire)
Eutrofización del agua dulce	Eutrofización potencial del agua dulce	kg P eq (agua dulce)
Eutrofización marina	Eutrofización potencial marina	kg N eq (agua marina)
Toxicidad humana	Toxicidad potencial humana	kg 1,4-DB eq (aire)
Formación de oxidantes fotoquímicos	Formación potencial de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC (aire)
Formación de partículas en suspensión	Formación potencial de partículas en suspensión	kg PM10 eq (aire)
Ecotoxicidad terrestre	Ecotoxicidad potencial terrestre	kg 1,4-DB eq (suelo)
Ecotoxicidad de agua dulce	Ecotoxicidad potencial de agua dulce	kg 1,4-DB eq (agua dulce)
Ecotoxicidad marina	Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DB eq (agua marina)
Radiación ionizante	Radiación ionizante potencial	kBq U235 eq (aire)
Transformación de suelo natural	Transformación de suelo natural	m ² de superficie

Para la construcción del modelo se trató de introducir los consumos específicos de cada uno de los procesos, que se registraron *in situ* para la maquinaria de la central de Lozoyuela (astilladora, cribadora y pala cargadora). Para las operaciones que tienen lugar en monte se acudió a los operarios de cada una de las máquinas, y se contrastó con la literatura su consumo en función de su

rendimiento. En cuanto al consumo en el transporte, se acudió también a las personas encargadas y se enviaron encuestas a las casas distribuidoras de sus marcas, en este caso los consumos en banco de pruebas eran menores que los reales y se tomó por cierta la información de los camioneros.

Por último, para los consumos de la caldera se acudió al registro que recoge la cantidad de astilla consumida, el tiempo de funcionamiento para su combustión y el consumo eléctrico para su alimentación y el accionamiento de las bombas de distribución de agua caliente en el camping de Gargantilla del Lozoya (único cliente que tenía recogidos y almacenados estos datos).

Este ACV analiza todos los procesos, desde la extracción de materia prima hasta la combustión final de la astilla, para lo que es común el uso de procesos ya existentes en bases de datos. Por ejemplo, para los impactos asociados a ciertos bienes de equipo (construcción y distribución de la maquinaria empleada, como autocargador o cosechadora), hay que obtener datos sobre extracción de materia prima, producción, transporte, uso y desecho de la maquinaria, analizando las entradas de materiales y energía y las salidas en forma de residuos y emisiones al agua, suelo o aire. Se ha acudido a bases de datos y estudios previos para obtener esta información, tanto a procesos de la base de datos Ecoinvent v2.0 y 3.0, como a artículos científicos (KARJALAINEN & ASIKAINEN, 1996; ATHANASSIADIS et al, 2002; JIROUSEK et al, 2007; HOLZLEITNER et al, 2011), modificando en determinados casos algunos de los valores para adaptarlos a los procesos analizados.

3.2. Desarrollo del Inventario de Ciclo de Vida para cada fase

1. Extracción de materia prima

Esta fase corresponde a la corta y desembosque de madera. Para su caracterización se realizó un estudio de tiempos y rendimientos, incluyendo consumos, en una clara realizada por la empresa Transportes El Cardoso S.L. en una repoblación del Término de Montejo de la Sierra, representativa de estas operaciones de suministro. Se compone de 4 procesos: 1) Desplazamiento de los trabajadores al monte (desde El Cardoso, haciendo cuatro viajes diarios - dos de ida y dos de vuelta, ya que paran al mediodía para comer -). Además, se consideró una visita diaria de los agentes medioambientales desde Montejo de la Sierra. 2) Apeo, desrame y tronzado (con una cosechadora Timberjack D1070D con cabezal de sierra en punta de grúa de 12 metros, apoyada por dos motosierras STIHL 066). 3) Saca a cargadero con un autocargador Timberjack 1100 que carga la madera preparada por la cosechadora, separando las trozas en función de su destino para dejarlas clasificadas en cargadero, y 4) Transporte a Lozoyuela (con un camión Volvo FM12, de caja rígida y remolque, que carga con su propia grúa y transporta las trozas destinadas al astillado).

2. Astillado

Se contabilizan las entradas y salidas para obtener la astilla, con una astilladora Jenz HEM 582 DQ. Se incluye también el transporte de la astilladora desde su base en Naval Moral de la Mata.

3. Cribado

Separa la astilla G50 del residuo, a través de 3 procesos: 1) Carga con carretilla telescópica con pala frontal de la astilla acumulada en el exterior de la nave en la tolva. 2) La astilla se conduce por cintas transportadoras a la placa de cribado, que la clasifica por tamaño, llevando las partículas de menor tamaño con una cinta auxiliar al exterior de la nave, y acumulando la astilla G50 en la nave. 3) Recogida de la astilla por la carretilla telescópica y carga en el camión.

4. Transporte y combustión de la astilla

En esta fase se distinguen los siguientes procesos: 1) Transporte de la astilla desde Lozoyuela a los clientes. El camión sale de Rascafría, donde tiene la base, hasta Lozoyuela, donde carga la astilla y se dirige a su destino (el camping de Gargantilla, el colegio de Alcobendas o la piscina de Soto del Real). 2) Almacenamiento de la astilla en sus depósitos, alimentación de la caldera, combustión y circuito de distribución del agua caliente a las instalaciones, mediante una serie de bombas. 3) Tratamiento de residuos (de las cenizas de la combustión). Su porcentaje es un 0,5% en peso de las astillas. El tratamiento consistía en su uso como fertilizante de los jardines del camping.

4. Resultados

4.1 Inventario de Ciclo de Vida.

Las entradas en los distintos procesos y subprocesos que se han definido se presentan en la Tabla 2. Las unidades consideradas para todos los combustibles y lubricantes son l/MWh, para el consumo de astilla en la caldera t/MWh, y para el consumo eléctrico en la alimentación de la caldera y la distribución de calor al consumidor final (piscinas) MWh/MWh.

Tabla 2. Entradas estimadas para los distintos procesos y subprocesos. Cantidades, unidades y fuentes.

Entradas	Cantidad	Unidad	Fuente
Proceso: Aprovechamiento de madera			
Subproceso: Desplazamiento de trabajadores y gestores al monte			
Gasóleo	0,029	l/MWh	Cálculo propio
Aceite	0,001		Performance Oil Technology LLC (2009)
Subproceso: Apeo y elaboración con cosechadora forestal, labores auxiliares con motosierra			
Gasóleo agrícola cosechadora	0,85	l/MWh	Cálculo propio
Aceites cosechadora	0,044		JIROUSEK et al. (2007)
Gasolina mezcla motosierras	0,043		Cálculo propio
Aceite mezcla motosierras	8,71·10 ⁻⁴		Leñas y Transportes El Cardoso S.L.
Aceite cadena motosierras	0,027		
Subproceso: Desembosque con autocargador			
Gasóleo agrícola	0,533	l/MWh	Cálculo propio
Aceites	0,014		JIROUSEK et al. (2007)
Subproceso: Transporte de madera en rollo			
Gasóleo	0,761	l/MWh	Cálculo propio
Aceites	0,038		Performance Oil Technology LLC (2009)
Proceso: Astillado			
Subproceso: Transporte de madera al centro logístico			
Gasóleo	0,283	l/MWh	Cálculo propio
Aceites	0,014		Performance Oil Technology LLC (2009)
Subproceso: astillado con astilladora			
Gasóleo	1,11	l/MWh	J.L. CEREZO (CEBARMADRID), 2014
Aceites	0,21		J.L. PRIETO (EXVER), 2014
AdBlue	0,07		J.L. PRIETO (EXVER), 2014
Proceso: Cribado			
Subprocesos: Transporte de la astilla a la cribadora y carga de astilla G50 en camión (pala telescópica)			
Gasóleo	0,215	l/MWh	Cálculo propio
Aceites	6,16·10 ⁻⁵		J.L. CEREZO (CEBARMADRID), 2014
Subproceso: Cribado con cribadora			
Gasóleo	0,366	l/MWh	Cálculo propio
Aceites	8,23·10 ⁻⁵		J.L. CEREZO (CEBARMADRID), 2014
Grasa	9,86·10 ⁻⁵		J.L. CEREZO (CEBARMADRID), 2014
Proceso: Transporte y combustión de la astilla			
Subproceso: Transporte de astilla a centros de consumo			
Gasóleo	3,04	l/MWh	Cálculo propio
Aceites	0,152		Performance Oil Technology LLC (2009)
Subproceso: Combustión de astilla, distribución de agua caliente			
Astilla	0,357	t/MWh	A. GONZALO (CAMPING MONTE HOLIDAY), 2013

Electricidad	0,0405	MWhe/MWh	
--------------	--------	----------	--

4.2 Caracterización de los impactos. Contribución de los subprocesos.

Los valores de los impactos (antes de su normalización) se muestran en la Tabla 3, en que se refleja la contribución porcentual a cada categoría de impacto de cada uno de los procesos considerados.

Los resultados absolutos para las categorías de impacto consideradas se multiplican por unos factores de normalización definidos en la metodología ReCiPe 2008, obteniendo finalmente un valor adimensional “normalizado” que permite comparar entre sí los impactos y valorar su importancia relativa. Como muestra la Figura 2, el impacto ambiental más importante es la Transformación del suelo natural, mucho más relevante que el resto de impactos, siendo su valor casi el doble que el de la Eutrofización del agua dulce, y casi diez veces más que el siguiente en importancia, la Ecotoxicidad marina. En el lado opuesto, se aprecia que la importancia de impactos como el Agotamiento del ozono, la Eutrofización marina, la Ecotoxicidad terrestre y la Ecotoxicidad de agua dulce presentan un peso casi imperceptible en comparación con el resto de categorías de impacto.

Tabla 3: Contribución de los subprocesos a las categorías de impacto. Se resaltan en gris claro las contribuciones mayores del 10% y en gris oscuro las superiores al 20%.

Categoría de impacto	Unidad	Total	Astillado	Apeo motosierra y cosechadora	Saca con autocargador	Cribado	Carga de astilla	Transporte astillas	Transp. madera en rollo	Transp. operarios al monte	Combustión
Cambio climático	kg CO2 eq	47,01	11,14	5,99	2,94	2,06	2,26	16,25	7,76	0,12	51,49
Agotamiento del ozono	kg CFC-11 eq	3,72E-06	8,82	14,56	5,04	1,95	3,76	20,90	5,95	0,11	38,92
Acidificación terrestre	kg SO2 eq	0,36	12,89	5,56	1,04	1,39	2,35	10,93	4,95	0,05	60,85
Eutrofización del agua dulce	kg P eq	0,01	2,47	1,70	1,06	0,00	1,65	4,71	2,26	0,07	86,34
Eutrofización marina	kg N eq	0,01	17,15	9,06	5,10	2,20	3,08	12,74	6,20	0,04	44,42
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	48,79	6,11	5,50	3,31	1,23	3,27	14,14	4,74	0,16	61,54
Formación de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC	0,29	22,87	9,54	1,63	2,91	3,95	17,00	7,89	0,06	34,15
Formación de partículas en suspensión	kg PM10 eq	0,12	16,80	5,35	1,04	1,39	3,28	12,94	6,13	0,06	53,00
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	0,03	6,72	2,44	1,46	0,38	2,51	30,49	15,58	0,25	40,16
Ecotoxicidad de agua dulce	kg 1,4-DB eq	0,01	8,42	6,87	4,05	1,77	3,47	24,60	9,17	0,75	40,90
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DB eq	29,75	6,26	5,26	3,11	0,95	2,16	18,05	7,02	0,22	56,97
Radiación ionizante	kBq U235 eq	16,53	1,95	1,85	1,08	0,24	1,08	4,90	1,64	0,03	87,23
Transformación de suelo natural	m2	0,01	10,39	10,18	6,06	2,24	2,48	25,12	7,01	0,11	36,41

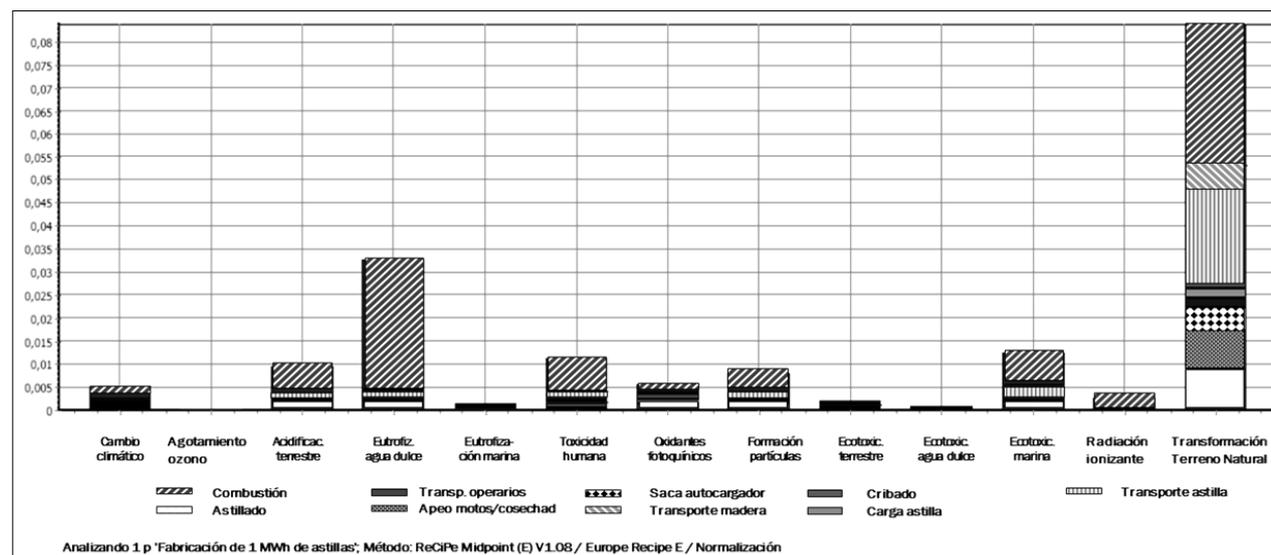


Figura 2. Impactos normalizados en las distintas categorías y contribución de los subprocesos.

El proceso “Combustión” aporta el mayor peso en las categorías de impacto que son comparativamente más relevantes, superando en muchos casos el 50%. Por ello, si se desea buscar alternativas de mejora sobre el ciclo de vida, sería interesante plantearlas en la combustión y procesos asociados. El proceso “Transporte de astilla” también conlleva una carga importante debido a la poca capacidad de transporte de los camiones que se usan, el consumo de los mismos y la distancia de suministro a los clientes, aspectos con posibilidades de mejora. El tercer proceso en importancia es el “Astillado”. Sin embargo, como incluye no sólo el astillado de la madera sino también el transporte de la astilladora desde Naval Moral de la Mata y vuelta, la carga ambiental del astillado en sí no es tan relevante. Además, su impacto ambiental es bastante variable, ya que depende de la cantidad de madera que se astille en cada viaje, de forma que será preferible, económica y ambientalmente, que cada vez que se desplace astille mucha cantidad de madera, aunque impone un límite la capacidad de los depósitos de astilla del centro. También depende este impacto de la distancia de transporte de la astilladora alquilada, que en el presente caso es alta.

A continuación destacan los procesos de “Apeo con motosierra y cosechadora” y “Transporte de madera en rollo”, con cargas de hasta el 15% en alguna de las categorías, pero en general con una importancia mucho menor que las anteriores. Por último, el resto de procesos tienen una relevancia muy pequeña, o casi anecdótica respecto al ciclo de vida de la astilla de madera estudiado.

La consideración de los bienes de equipo (fabricación, mantenimiento y reciclado o eliminación de desechos de maquinaria, construcción y mantenimiento de infraestructuras) para la categoría de impacto de “Calentamiento Global” en el ciclo de vida completo supone un peso del 29% (Tabla 4). Se han considerado bienes de equipo, además de la maquinaria forestal, los camiones, la caldera y las infraestructuras. El proceso más relevante en este peso de los bienes de equipo es la “Combustión de astilla”, que incluye como bien de equipo la caldera de astilla, además de las cargas derivadas de su consumo eléctrico (extracción de fuentes energéticas, producción y distribución de energía eléctrica). Si no se considerase este proceso, el peso porcentual en esa categoría de impacto de los bienes de equipo pasaría a ser en torno al 12,5%. En la combustión, un 57% de las emisiones se atribuyen al consumo eléctrico, frente a un 43% proveniente de los bienes de equipo, tanto la propia caldera como, en mayor medida, los asociados a los distintos tipos de energía del mix eléctrico español (instalación de centrales de carbón y su combustión, construcción de centrales nucleares, extracción de gas natural... y el transporte de esta energía hasta el lugar de consumo).

Tabla 3. Porcentajes de aportación a la categoría de impacto “Cambio Climático” de los bienes de equipo para los diferentes subprocesos.

		Astillado	Apeo motosierra y cosechadora	Saca con autocargador	Cribado	Carga de astilla	Transp. Astillas	Transp. madera en rollo	Combustion
Porcentaje total	100,0	11,1	6,0	2,9	2,1	2,3	16,3	7,8	51,5
Kg CO ₂ SimaPro	47,0	5,2	2,8	1,4	1,0	1,1	7,6	3,6	24,2
Kg CO ₂ IDAE	33,1	4,2	2,4	1,3	1,0	0,7	7,3	2,5	13,8
% Combust.	70,4	80,2	84,2	94,1	99,1	65,9	95,6	68,5	56,9
%Bienes equipo	29,6	19,8	15,8	5,9	0,9	34,1	4,4	31,5	43,1

Si, para reducir el impacto de considerar el mix energético, se compara esa situación (caldera alimentada y agua caliente bombeada por motores eléctricos que usan energía de la red) con el uso de energía eléctrica exclusivamente procedente de una fuente renovable – por ejemplo, energía de origen fotovoltaico – se obtienen las diferencias de impactos que se reflejan en la Tabla 4. Los

impactos se reducen en prácticamente todas las categorías, excepto los aumentos muy ligeros en “Toxicidad humana” y “Ecotoxicidad marina” y un incremento sensible en la categoría “Ecotoxicidad terrestre” (aunque su impacto normalizado sigue siendo poco relevante).

Tabla 4. Impactos del proceso actual usando electricidad de la red española y supuesto el uso exclusivo de electricidad de origen fotovoltaico. Diferencias porcentuales.

Categoría de impacto	Unidad	E. fotovoltaica	Mix energético	Variación (%)
Cambio climático	kg CO ₂ eq	27,621	48,706	-43,29
Agotamiento del ozono	kg CFC-11 eq	2,754E-06	3,717E-06	-25,93
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	0,144	0,325	-55,73
Eutrofización del agua dulce	kg P eq	0,004	0,013	-66,63
Eutrofización marina	kg N eq	0,009	0,014	-33,40
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	2,350	2,173	8,17
Formación de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC	0,215	0,300	-28,40
Formación de partículas en suspensión	kg PM ₁₀ eq	0,066	0,118	-44,29
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	0,006	0,002	160,64
Ecotoxicidad de agua dulce	kg 1,4-DB eq	0,006	0,007	-16,50
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DB eq	0,048	0,045	6,30
Radiación ionizante	kBq U235 eq	2,616	16,504	-84,15
Transformación de suelo natural	m ²	0,010	0,014	-24,02

Si se compara el escenario base (caldera de astilla) con la alternativa de usar una caldera de gasóleo de potencia instalada equivalente, teniendo también en cuenta el peso de dicha caldera como bien de equipo, los resultados de esta comparación se muestran en la Tabla 5. Los impactos asociados a la caldera de gasóleo son superiores a los de la caldera de biomasa, salvo en las categorías “Eutrofización de agua dulce”, (-35%), y “Radiación ionizante” (-51%). Para el resto, se logran importantes descensos, destacando “Cambio climático” (85%), “Agotamiento del ozono” (92%), “Ecotoxicidad de agua dulce” (93%) y “Transformación del suelo natural” (89%).

Tabla 5. Impactos del proceso actual comparados con el uso de una caldera equivalente de gasóleo para la producción de energía térmica. Diferencias porcentuales.

Categoría de impacto	Unidad	Caldera de gasoil	Caldera de biomasa	Variación (%)
Cambio climático	kg CO ₂ eq	318,841	48,706	84,72
Agotamiento del ozono	kg CFC-11 eq	4,66E-05	3,72E-06	92,03
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	0,613	0,325	47,02
Eutrofización del agua dulce	kg P eq	0,010	0,013	-35,56
Eutrofización marina	kg N eq	0,015	0,014	8,14
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	5,429	2,173	59,98
Formación de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC	0,508	0,300	41,04
Formación de partículas en suspensión	kg PM ₁₀ eq	0,178	0,118	33,72
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	0,005	0,002	54,79
Ecotoxicidad de agua dulce	kg 1,4-DB eq	0,106	0,007	93,39
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DB eq	0,079	0,045	42,71
Radiación ionizante	kBq U235 eq	10,881	16,504	-51,68
Transformación de suelo natural	m ²	0,122	0,014	88,87

5. Discusión

Como se ha señalado, la transformación de uso del suelo es el impacto normalizado más relevante, lo que se puede achacar a la extracción de petróleo, carbón o gas que contribuyen al mix

energético español, junto con la de los derivados del petróleo que se emplean como combustibles y lubricantes con las transformaciones en el territorio que provocan. En menor medida, afecta la extracción de los materiales para la fabricación de la maquinaria. La definición del MWh térmico a disposición del usuario final como unidad funcional (y por ella la inclusión de los procesos de alimentación de la caldera y distribución del agua caliente dentro del sistema) y la consideración de los bienes de equipo - maquinaria, medios de transporte, infraestructura, caldera, etc.- ponen de relieve impactos menos visibles con una definición del sistema más restringida. Los procesos de transporte cobran también importancia porque en su ciclo de vida se incluye la construcción, mantenimiento y eliminación de las carreteras, con el consecuente cambio de uso suelo.

El segundo impacto en lo que a importancia se refiere es la “Eutrofización del agua dulce”. En este caso, el proceso de combustión es responsable de más del 80%, con lo que se sigue corroborando la importancia de dicho proceso sobre el medio ambiente.

El peso de los bienes de equipo en el conjunto de los impactos es muy superior a otros estudios en que no se incluyó la fase de combustión (y por ello la fabricación y uso de la caldera). Por ejemplo, en el caso de ATHANASSIADIS et al. (2002), el peso de la maquinaria forestal considerada como bien de equipo en el proceso sólo supuso un 6 % de las emisiones, frente a un 29,6%, por la inclusión de la caldera y, en menor medida, los medios de transporte e infraestructuras, en el presente estudio. Es más, si se hubieran incluido las infraestructuras forestales (pistas y vías de saca), posiblemente el peso de los bienes de equipo habría aumentado considerablemente, como señalan los estudios de KARJALAINEN & ASIKAINEN (1996) y subraya también HEINIMAN (2012).

En cuanto al peso relativo dentro del proceso más impactante (combustión) del consumo de energía eléctrica del mix español, reforzado por la comparación hipotética con la utilización de energía fotovoltaica, pone de manifiesto la potencialidad de mejora en los impactos de la biomasa como energía renovable si se aumenta la proporción de energías renovables en la producción eléctrica, como señalan WANG et al. (2012).

El estudio llevado a cabo en Cataluña por ESTEBAN et al. (2014) es el único con análogo sistema y unidad funcional, aunque no tiene en cuenta los bienes de equipo. Comparando los resultados, el peso de los procesos en los impactos es muy similar. El de combustión es también el más importante en lo que a carga ambiental se refiere, con resultados prácticamente idénticos en algunas de las categorías evaluadas, aunque se muestran algunas diferencias en Eutrofización de agua dulce, con una carga menor al presente estudio (un 12,3 frente a un 40%) o cambio climático (52 frente a 77%). Los autores achacan la carga relevante de la combustión a las emisiones de NOx, y, como en el presente estudio, al consumo eléctrico de la caldera. El proceso de transporte también es el segundo más relevante, poniendo de manifiesto la trascendencia ambiental (además de económica) de reducir las distancias y aumentar en lo posible las cargas transportadas.

Ambos estudios comparan la caldera de biomasa con otra equivalente de gasóleo, y en ambos la caldera de gasoil tiene unos impactos mucho mayores, excepto en la categoría de “Eutrofización de agua dulce”, en la que sucede lo contrario. ESTEBAN et al. (2014) lo achacan a la combustión de la biomasa, principalmente a las emisiones de NOx que emite la astilla al quemarse en una caldera.

6. Conclusiones

A lo largo del ciclo de vida, el proceso “Combustión de la astilla” es el más relevante por sus impactos ambientales, aun considerando neutras sus emisiones de CO₂. Dentro del proceso, la mayor carga recae en el uso de electricidad de la red para la alimentación de la caldera y distribución del agua caliente, aunque también es importante la fabricación de la propia caldera y equipos auxiliares,

considerados como bienes de equipo. El transporte de la astilla a los clientes también conlleva una carga considerable en el caso observado, aunque tiene posibilidades de mejora.

Los resultados normalizados muestran que la categoría de impacto más grave es la transformación del suelo natural, con una carga aproximadamente del doble a la eutrofización de agua dulce y casi diez veces más que la siguiente categoría. Este impacto se debe a la extracción de materias primas para la fabricación de máquinas, medios de transporte y caldera, a la producción de electricidad de fuentes convencionales y a la construcción de infraestructuras de transporte.

La carga debida a los bienes de equipo para la categoría de cambio climático, si se incluye en el cálculo la referente a la obtención de energía eléctrica, es de un 29,6%, lo que indica la gran importancia de la electricidad para esta categoría. Incluso sin considerarla, el peso de los bienes de equipo sería un 12,5%, lo que refuerza el interés de tenerlos en consideración en estos estudios.

Al comparar los impactos producidos por una caldera de biomasa cuya fuente de energía procede del mix energético español con otra que usara únicamente energía fotovoltaica, se produce un claro descenso de todos los impactos en el segundo caso, salvo para la toxicidad humana, ecotoxicidad terrestre y marina, cuyo peso normalizado no es muy considerable.

Si se comparan los impactos de la caldera de astilla con una equivalente de gasóleo, los valores son mucho menores en los impactos ambientales, a excepción de la eutrofización de agua dulce y la radiación ionizante, debidos a la combustión de material vegetal forestal.

7. Agradecimientos

El equipo del profesor SAN MIGUEL, de la E.T.S.I, Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid facilitó el uso del programa SimaPro, apoyando a los autores en la introducción de datos e interpretación de las salidas.

8. Bibliografía

ATHANASSIADIS, D.; LIDESTAV, G.; NORDFJELL T.; 2002. Energy use and emissions due to the manufacture of a forwarder. *Resour conser recy* 34: 149-160.

BERG, S.; 1997. Some aspects of LCA in the analysis of forestry operations. *J Clean Prod* 5(3): 211-217.

BOSNER, A.; PORSINSKY, T.; STANKIC, I.; 2012. Forestry and Life Cycle Assessment. *Global Perspective of Sustainable Forest Management*. ISBN 978-953-51-0569-5. Pág. 139 - 160.

BROGAARD, L- K.; CHRISTENSEN, T. H.; 2016. Life cycle assessment of capital goods in waste management systems. *Waste Manage* 56: 561-574.

CASERINI, S.; LIVIO, S.; GIUGLIANO, M.; GROSSO, M; RIGAMONTI, L; 2010. LCA of domestic and centralized biomass combustion: The case of Lombardy (Italy). *Biomass Bioenergy* 34: 474-482.

CESPI, D.; PASSARINI, F.; CIACCI, L.; VASSURA, A.; CASTELLANI, V.; COLLINA, E.; PIAZZALUNGA, A.; MORSELLI, L.; 2014. Heating systems LCA: comparison of biomass-based appliances. *Int J LCA* 19: 89–99.

FRISCHKNECHT, R.; ALTHAUS, H.-J.; BAUER, C.; DOKA, G.; HECK, T.; JUNGBLUTH, N.; KELLENBERGER, D.; NEMECEK, T.; 2007. The Environmental Relevance of Capital Goods in Life Cycle Assessments of Products and Services. *Int J LCA* 12(1): 7-17.

ESTEBAN, B.; RIBA, J.; BAQUERO, G.; PUIG, R.; RIUS, A.; 2014. Environmental assessment of small-scale production of wood chips as a fuel for residential heating boilers. *Renew Energy*, 62: 106-115.

GOEDKOOP, M.; HEIJUNGS, R.; HUIJBREGTS, M.; DE SCHRYVER, A.; STRUJIS, J.; VAN ZELM, R.; 2009. ReCiPe 2008. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and endpoint level. 132 pág.

HEINIMAN, H. R.; 2012. Lyfe Cycle Assesment (LCA) in Forestry – State and Perspectives. *Croat J For Eng* 33(2): 357-372.

HOLZLEITNER, F.; KANZIAN, C.; STAMPFER, K.; 2011. Analyzing time and fuel consumption in road transport of round wood with an onboard fleet manager. *Eur J Forest Res* 130: 293-301.

IDAE, 2016. Informe Estadístico Energías Renovables. En <http://infomeestadistico.idae.es/t1.htm>.

JIROUSEK, R.; KLVAC, R.; SKOUPÝ, A.; 2007. Productivity and costs of the mechanized cut-to-length wood harvesting system in clear-felling operations. *Journal of Forest Science*, 53 (10): 476-482.

KARJALAINEN, T.; ASIKAINEN, A.; 1996. Greenhouse gas emissions from the use of primary energy in forest operations and long-distance transportation of timber in Finland. *Forestry* 69 (3): 215-228.

MAKKONEN, I.; 2004. Saving fuel in mechanized forestry operations. Forest Engineering Institute of Canada, Pointe-Claire, QC. Internal Report IR-2004-08, 10 pág.

McMANUS, L. C.; 2010. Life cycle impacts of waste wood biomass heating systems: A case study of three UK based systems. *Energy* 35: 4064-4070.

PEHNT, N.; 2006. Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies. *Renew Energy* 31: 55-71.

PRADA, M.; MARTÍNEZ-ALONSO, C.; SÁNCHEZ-GARCÍA, S.; CANGA, E.; 2015. Analysis of three forest chippers: productivity, costs and GHG emissions in Northern Spain. *J Cleaner Prod* 101: 238-244.

VALENTE, C.; SPINELLI, R.; HILLRING, B. g.; 2011. LCA of environmental and socioeconomic impacts related to wood energy production in alpine conditions: Valle di Fiemme (Italy). *J Clean Prod* 19: 1931-1938.

WANG, C.; ZHANG, L.; YANG, S.; PANG, M.; 2012. A Hybrid Life-Cycle Assessment of Nonrenewable Energy and Greenhouse-Gas Emissions of a Village-Level Biomass Gasification Project in China. *Energies* 5: 2708–2723.