

•
•
•
•
•
•
•

Balance energético de la producción de pelets a partir de *Cynara cardunculus*

Febrero de 2009

Balance energético de la producción de pelets a partir de *Cynara cardunculus*

1. Antecedentes	3
2. Objetivos y estructura del estudio.....	4
3. Metodología: supuestos e hipótesis de partida	5
3.1. <i>Consideraciones generales</i>	<i>5</i>
3.2. <i>Delimitación del sistema de estudio.....</i>	<i>6</i>
3.2.1. <i>Introducción</i>	<i>6</i>
3.2.2. <i>Subsistema cultivo.....</i>	<i>7</i>
3.2.3. <i>Subsistema transporte</i>	<i>10</i>
3.2.4. <i>Subsistema transformación.....</i>	<i>11</i>
4. Resultados del estudio	13
4.1. <i>Subsistema cultivo: requerimientos energéticos para la producción de biomasa de cardo</i>	<i>13</i>
4.1.1. <i>Requerimientos energéticos de las labores agrícolas mecanizadas.....</i>	<i>13</i>
4.1.2. <i>Requerimientos energéticos para la producción, envasado y transporte de los insumos (fertilizantes y herbicidas)</i>	<i>15</i>
4.1.3. <i>Requerimientos energéticos para los desplazamientos de la maquinaria agrícola... 16</i>	
4.1.4. <i>Subsistema cultivo: síntesis de resultados</i>	<i>17</i>
4.2. <i>Subsistema transporte: requerimientos energéticos para el transporte de la biomasa a la planta peletizadora.....</i>	<i>19</i>
4.3. <i>Subsistema transformación: requerimientos energéticos para la producción de pelets de biomasa procedente del cardo.....</i>	<i>20</i>
4.4. <i>Energía primaria total utilizada para la producción de pelets a partir de cardos: síntesis de resultados.....</i>	<i>21</i>
5. Eficiencia energética de la producción de pelets de cardo	21
6. Conclusiones	22
Bibliografía	24

Balance energético de la producción de pelets a partir de *Cynara cardunculus*

1. Antecedentes

Los efectos nocivos provocados por el uso masivo de los combustibles fósiles que incrementan la contaminación contribuyendo al efecto invernadero y al cambio climático, así como la continua volatilidad de los precios del petróleo y todos sus derivados, han motivado que durante los últimos años se dediquen cada vez más recursos a la búsqueda y el impulso de nuevas fuentes energéticas menos agresivas con el medio ambiente y que contribuyan a romper la actual dependencia de los combustibles fósiles. En este contexto donde las energías renovables tienen un papel fundamental, las generadas a partir de recursos procedentes del sector agrario ocupan un lugar destacado.

Durante los últimos años el uso de la biomasa agraria como fuente de energía se ha ido desarrollando de manera progresiva, en gran medida como respuesta a las políticas de incentivación de las energías renovables que se han implementado. No obstante, este avance del sector de la bioenergía posee también detractores; sobre todo cuando se utilizan cultivos que tradicionalmente se han destinado al mercado alimentario (cereales y oleaginosas) y cuando existen dudas acerca de que los balances energético y de emisiones resulten netamente favorables.

Ante esta situación, los denominados cultivos energéticos “verdaderos”, entendiendo como tales aquellos cuya producción tiene como principal destino la obtención de biocarburantes, biocombustibles y biomasa lignocelulósica, no entran en competencia con el destino alimentario, y presentan además otras importantes ventajas como un buen comportamiento agronómico en tierras marginales o retiradas de la producción, altos niveles de productividad ligados a bajos costes productivos y generalmente buena adaptabilidad a condiciones de temperatura, precipitaciones, salinidad, ... extremas, lo que facilita que puedan alcanzar gran potencial de desarrollo en muchas zonas de cultivo andaluzas.

Las ventajas mencionadas se verían mermadas e incluso anuladas si estas especies no obtuviesen un balance medioambiental más favorable¹ que si la tierra donde fueran a cultivarse se mantuviera en barbecho o se dedicara a un cultivo tradicional. Así, se han de analizar todos los efectos ambientales derivados de su proceso de cultivo y de los consumos energéticos necesarios para su realización, así como las emisiones y residuos generados en dicho proceso y los efectos ambientales debidos a la finalización del ciclo de vida del cultivo.

En este sentido, es crucial la existencia de un balance energético positivo y un balance de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) negativo. Esto quiere decir, por un lado, que la energía neta contenida en el biocombustible obtenido de la biomasa resulte superior a la

¹ Minimización de impactos ambientales asociados, por ejemplo, al consumo de recursos (insumos), contaminación acústica, contaminación del suelo y el agua (acidificación y eutrofización) y garantía de uso racional de los recursos naturales.

energía primaria gastada en todo el proceso productivo (incluido el cultivo y la obtención del biocombustible); y por otro, que las emisiones de los principales GEI generadas por dichos procesos sean inferiores a las generadas por los combustibles fósiles que pretenden sustituir.

El análisis que ahora se presenta se enmarca en el Plan Andaluz de Acción por el Clima 2007-2012 aprobado por el Gobierno Andaluz para desarrollar la Estrategia Andaluza ante el Cambio Climático². El Plan se estructura en tres programas referidos a la Mitigación, Adaptación y Comunicación, concierne en concreto a la medida 65 del Programa de Mitigación³, la acción que representa este análisis. La medida se refiere, en concreto, a la “*Realización de estudios energéticos en el sector agrario, pesquero y acuícola y la industria auxiliar que permitan conocer el balance energético del ciclo de vida de los productos agropecuarios producidos y comercializados en Andalucía*”, y este estudio es el primer paso en lo que a ella se refiere.

Son varias las razones por las que se ha elegido el cardo como la primera de las especies a analizar: se trata de un cultivo energético cuyas características y propiedades, así como ciclo de desarrollo y escasas exigencias, convierten en una de las materias primas más interesantes para la obtención de biomasa lignocelulósica. Asimismo, de sus semillas se puede extraer aceite apto para producción de biodiésel, si bien, su potencial como materia prima agrícola para la obtención de este biocombustible aún no ha sido suficientemente estudiado. Por otro lado, se trata de una especie que forma parte del Plan de Cultivos Energéticos que la Consejería de Agricultura y Pesca puso en marcha en 2006/07 como una de las medidas del **Plan de Acción para el Impulso de la Producción y Uso de la Biomasa Agraria en Andalucía**⁴ (integrado también en el PAAC), tratándose pues de una especie plurianual de la que se dispone de información suficiente para iniciar el estudio⁵.

2. Objetivos y estructura del estudio

Como ya se ha comentado en el apartado precedente, conocer el balance energético y los potenciales impactos medioambientales de los cultivos energéticos destinados a la obtención de biocombustibles se convierte en una de las tareas fundamentales para decidir qué estrategia seguir en cada caso.

² La Estrategia fue aprobada en septiembre de 2002 permitiendo que Andalucía se convirtiera en la primera Comunidad en contar con una Estrategia de estas características (Acuerdo de 3 de septiembre de 2002, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba la adopción de una estrategia autonómica ante el cambio climático).

³ Aprobado por el Consejo de Gobierno de la Junta de Andalucía el 5 de junio de 2007; tiene como objetivo principal reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en Andalucía y alcanzar, en términos de emisiones de GEI *per cápita*, una reducción del 19% de las emisiones de 2012 respecto de las de 2004. Para ello se han definido 140 medidas de obligado cumplimiento para la Junta de Andalucía, que se desarrollarán de forma coordinada y complementaria entre las diferentes Consejerías.

⁴ Otras especies incluidas durante la campaña 2007/08 en el Plan de Cultivos Energéticos (que se lleva a cabo en fincas de titularidad pública) son *Jatropha curcas*, especie innovadora en el campo de la producción de biodiesel, y *Sorghum bicolor*, *Arundo donax* y *Paulownia sp.*, en el ámbito de la obtención de biomasa lignocelulósica.

⁵ Cabe indicar también que los primeros ensayos de cultivos energéticos que se pusieron en marcha en las fincas de titularidad pública que gestiona la Empresa Pública Desarrollo Agrario y Pesquero fueron de *Cynara*. En concreto se instauró durante la campaña 2005/06 en 5 fincas habiendo continuado sus ensayos durante las siguientes, como parte ya del Plan de Cultivos Energéticos, en varias de ellas.

El **objetivo general** del presente informe es **estudiar el balance energético de la producción de pelets a partir de la biomasa procedente de cardo teniendo en cuenta el ciclo completo del proceso: cultivo, transporte y transformación**. Como **objetivos específicos** cabe mencionar los siguientes:

- Identificar y cuantificar las entradas y salidas de energía primaria de los diferentes procesos que componen el sistema considerado.
- Identificar los procesos que demandan un mayor consumo de energía primaria.
- Analizar si el proceso en su conjunto es energéticamente eficiente.

Para responder a los objetivos mencionados se ha estructurado el estudio en cuatro capítulos (aparte del precedente y éste que nos ocupa). En el primero se presenta la metodología empleada, incluyéndose los supuestos e hipótesis de partida. En concreto, se expone un conjunto de consideraciones que se han tenido en cuenta en el análisis a la vez que se delimitan los subsistemas estudiados que son: cultivo del cardo, transporte de la biomasa a la planta peletizadora y transformación de ésta en pelets. Posteriormente se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los tres subsistemas. Analizados los resultados, se determina la eficiencia energética del proceso completo, para lo que se calcula el balance energético del proceso considerado definido como la relación entre la energía contenida en el producto obtenido y la energía total invertida en su producción. Finalmente, se presentan las conclusiones del estudio.

3. Metodología: supuestos e hipótesis de partida

3.1. Consideraciones generales

A continuación se exponen una serie de consideraciones que se han tenido en cuenta en el análisis del balance energético de la producción de pelets a partir de *Cynara cardunculus*.

- El cardo es un cultivo pluriannual cuya vida media útil se estima entre 7 y 10 años (Fernández, 1998). En el presente estudio se considera una **vida media útil de 8 años**.
- Se considera que la pluviometría media de la zona en la que se localiza la explotación varía entre 300 y 450 mm, estableciéndose un rendimiento máximo de 13,52 toneladas de biomasa por hectárea con una humedad de un 15% (Fernández, 2006a). Para la primera campaña, la de instauración del cultivo, se ha considerado que el rendimiento es el 40% del máximo establecido; para el resto de campañas el rendimiento que se ha tenido en cuenta ha sido el 80% del máximo establecido. En la Tabla 1 se recogen los rendimientos considerados para cada una de las campañas del ciclo.

Tabla 1 Rendimiento en biomasa procedente de cardo durante su ciclo vital.

	Rendimiento máximo establecido (t biomasa/ha año, humedad 15%)	% Rendimiento máximo considerado (t biomasa/ha año, humedad 15%)	Rendimiento medio anual considerado (t biomasa/ha año, humedad 15%)
Año 1 (campana de instauración del cultivo)	13,52	40%	5,41
Años 2-8 (campanas siguientes)		80%	10,82

Fuente: Elaboración propia.

Los rendimientos en biomasa de la tabla anterior son los que se han utilizado para realizar el balance y estimar la eficiencia energética de la producción de pelets de biomasa procedente del cardo. La conversión del consumo de energía primaria en MJ/ha a MJ/t de biomasa, se ha llevado a cabo teniendo en cuenta estos rendimientos.

3.2. Delimitación del sistema de estudio

3.2.1. Introducción

Tras una profunda revisión bibliográfica sobre los diversos aspectos que han de contemplarse cuando se realiza un estudio de las características del que nos ocupa, se ha subdividido el sistema a estudiar en tres subsistemas:

- **Subsistema cultivo:** contempla la producción de biomasa de *Cynara cardunculus*, y que incluye las labores agrícolas que conlleva la instauración, desarrollo y crecimiento del cultivo, así como las necesarias para la producción, envasado y transporte de los insumos utilizados en el mismo (fertilizantes y herbicidas). Este subsistema también incluye la energía consumida en los desplazamientos del tractor con cada apero desde el almacén a la parcela de cultivo así como la requerida para transportar tanto la semilla como los productos fertilizantes y fitosanitarios desde el almacén al lugar en el que se utilizan (los insumos se transportan hasta el lugar de cultivo en el interior de la sembradora, para el caso de la semilla, la abonadora, en el de los fertilizantes, o la máquina que se utilice en cada caso).
- **Subsistema transporte:** incluye las tareas de transporte de la biomasa obtenida desde la parcela donde se haya implantado el cardo hasta la planta de producción de pelets.
- **Subsistema transformación:** comprende todas las operaciones necesarias para llevar a cabo la conversión de la biomasa en pelets.

Diferenciados los tres subsistemas, a continuación se han establecido las líneas metodológicas a aplicar a cada uno de ellos.

3.2.2. Subsistema cultivo

La estimación de los requerimientos energéticos del primero de los subsistemas que componen el proceso se ha llevado a cabo a través del establecimiento de un itinerario técnico teórico de cultivo. Este itinerario se ha elaborado a partir de las experiencias de cultivo del cardo llevadas a cabo por la Empresa Pública Desarrollo Agrario y Pesquero en fincas de titularidad pública (como parte del Plan de Cultivos Energéticos iniciado por la Consejería de Agricultura y Pesca en la campaña 2005/06), así como de la información recabada en la revisión bibliográfica realizada. Cabe indicar que se ha pretendido establecer un itinerario representativo del cultivo de manera que los resultados y conclusiones derivadas de este estudio pudieran extrapolarse a otras experiencias con esta especie.

Respecto al itinerario técnico adoptado, recordar que el cardo es un cultivo plurianual, en el que durante el primer año se realizan labores de presiembra (preparación del terreno, abonado de fondo y aplicación de tratamientos herbicidas y fitosanitarios previos a la siembra), siembra (labores de siembra y tratamientos herbicidas y fitosanitarios), mantenimiento del cultivo (labores de aclareo, escarda y riego durante la etapa de crecimiento), y recolección, mientras que a partir del segundo año, se llevan a cabo esencialmente, labores de mantenimiento del cultivo y recolección⁶.

La Tabla 2 recoge el itinerario técnico adoptado para la campaña de instauración del cultivo y la Tabla 3 muestra las labores incluidas en el resto de las campañas del ciclo.

Tabla 2 Itinerario técnico del cultivo del cardo en la campaña de implantación.

Campaña de instauración del cultivo			
Etapa	Labor	Componente	Nº pases
Presiembra	Preparación del terreno	Subsolador	1
		Vibrocultivador	1
	Abonado de fondo	Abonadora centrífuga (aplicación 600 kg/ha de abono complejo: N-P-K, 8:15:15)	1
Siembra	Siembra	Sembradora de precisión (siembra de 5 kg/ha de semillas; densidad de plantación: 15.000 plantas/ha)	1
		Rulo	1
	Tratamiento herbicida	Pulverizador hidráulico (aplicación de 3l/ha de trifluralina (30%) y linurón (10%))	1
Crecimiento	Mantenimiento del cultivo (aclareo)	Cultivador de brazos	1
Recolección	Recolección	Cosechadora picadora de maíz	1
		Remolque autocargador	1

Fuente: Elaboración propia.

⁶ A partir del segundo año de cultivo también se puede realizar un abonado de cobertera y tratamientos fitosanitarios durante la etapa de crecimiento del cultivo, no obstante, no se han incluido dichas labores en el presente estudio ya que al tratarse de una especie destinada a la producción de biomasa con fines energéticos, se persigue lograr el menor impacto medioambiental posible minimizando al máximo tanto el uso de insumos como la realización de labores agrarias.

Tabla 3 Itinerario técnico del cultivo del cardo en las campañas siguientes a la de implantación.

Campañas posteriores			
Etapa	Labor	Componente	Nº pases
Crecimiento	Mantenimiento del cultivo (aclareo)	Cultivador de brazos	1
		Cosechadora picadora de maíz	1
Recolección	Recolección	Remolque autocargador	1

Fuente: Elaboración propia.

Definidas las labores agrícolas a realizar en las diferentes campañas y etapas de cultivo del cardo, la fase siguiente consiste en establecer los consumos energéticos que implican, expresados en megajulios por hectárea y megajulios por tonelada de biomasa. La energía invertida en cada labor agrícola mecanizada se ha calculado en base al consumo de carburante que requiere. Estos valores, expresados en litros de gasóleo por hectárea, se han obtenido de la publicación del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) “Consumos energéticos en las operaciones agrícolas en España” de marzo de 2005⁷. Para su transformación en términos energéticos, se ha considerado que 1 litro de gasóleo libera 42,47 MJ, incluyendo el aporte de la extracción y transporte del mismo⁸.

Asimismo, y continuando con el itinerario técnico del cultivo se ha asumido lo siguiente (IDAE, 2005):

- Para las labores de preparación del suelo (pases de subsolador, vibrocultivador y cultivador) los requerimientos energéticos considerados corresponden a un suelo de textura ligera y una profundidad de trabajo alta.
- En el caso del abonado, siembra y tratamientos herbicidas se ha considerado una anchura del apero (o trabajo en la labor) normal.
- En relación a la recolección, se han considerado capacidades de trabajo distintas para la primera campaña (de instauración del cultivo) y para las posteriores, debido a la variación de rendimientos alcanzados en ellas. Así, para la primera campaña, en la que el rendimiento obtenido es menor, se ha considerado una capacidad de trabajo “elevada” tanto para la cosechadora picadora de maíz como para el remolque autocargador, mientras que para las campañas posteriores, en las que los rendimientos obtenidos son mayores, se ha tenido en cuenta una capacidad de trabajo “media”.

Además de las labores mecanizadas, el subsistema **cultivo** incluye también los gastos energéticos derivados de la producción, envasado y transporte de los insumos utilizados durante el cultivo, que básicamente comprenden a los fertilizantes y productos fitosanitarios empleados.

⁷ Los datos extraídos de dicha fuente bibliográfica hacen referencia al consumo de gasóleo para cada una de las labores agrícolas consideradas.

⁸ Se ha considerado un valor calorífico neto del gasóleo de 36,61 MJ/l (IEA, 2007) y que la energía requerida para la producción y transporte de una unidad de gasóleo es un 16% de su valor calorífico neto (West y Marland, 2002). Por lo tanto, el valor calorífico neto total del gasóleo, incluida su extracción y transporte, es 42,47 MJ.

En el caso que nos ocupa, se ha considerado que la fertilización se realiza mediante un abono complejo N-P-K 8:15:15, por lo que la energía primaria requerida para su producción se ha estimado a través de la energía primaria media que requiere la obtención de las cantidades correspondientes de cada uno de los componentes simples del abono complejo, es decir, nitrógeno, fósforo y potasio. En la Tabla 4 se recoge la energía primaria requerida para la producción, envasado y transporte de nitrógeno, fósforo y potasio fertilizantes.

Tabla 4 Energía primaria requerida para la producción, envasado y transporte de fertilizantes (nitrógeno, fósforo y potasio).

Energía requerida para la producción, envasado y transporte de fertilizantes (MJ/kg fertilizante)			
	Nitrógeno fertilizante	Fósforo fertilizante	Potasio fertilizante
Producción	69,53	7,70	6,40
Envasado	2,60	2,60	1,80
Transporte	4,50	5,70	4,60
TOTAL	76,63	16,00	12,80

Fuente: Elaboración propia a partir de Gellings y Parmenter (2004).

En lo que respecta a los tratamientos fitosanitarios, el itinerario técnico elaborado contempla únicamente un tratamiento con herbicidas de siembra (una mezcla de trifluralina y linurón). En la Tabla 5 se muestra el consumo de energía primaria necesario para la producción, envasado y transporte de diferentes tipos de insumos, entre ellos, los herbicidas mencionados (NNFCC⁹, 2008).

Tabla 5 Energía primaria requerida para la producción de diferentes insumos (fungicidas, herbicidas, insecticidas, pesticidas) incluido el envasado y el transporte.

	Energía primaria requerida por los insumos (MJ/kg insumo)
Fungicidas	174,00
Herbicidas	265,00
Insecticidas	214,00

Fuente: Elaboración propia a partir de NNFCC (2008).

Asimismo, se han tenido en cuenta los consumos de gasóleo, y por tanto de energía, derivados de los desplazamientos de la maquinaria agrícola desde el almacén a la parcela de cultivo. Tal y como establece el IDAE (2005), para realizar los cálculos se ha considerado una distancia media desde el almacén donde se localiza la maquinaria agrícola hasta la parcela de 2 kilómetros (ida y vuelta). Igualmente se han tenido en cuenta los consumos que recoge el IDAE para los trabajos de desplazamiento y transporte que diferencia tres consumos, “medio”, “máximo” y “mínimo” en función de las condiciones de trabajo, para el desplazamiento de la maquinaria con carga y sin ella.

Asimismo, se considera que el consumo de carburante es variable para determinadas máquinas (sembradoras y maquinaria de distribución de fertilizantes y fitosanitarios).

⁹ “National Non-Food Crops Centre”. Centro nacional de combustibles renovables, materiales y tecnologías del Reino Unido que desarrolla y lleva a cabo tareas de información y asesoramiento en relación a estas áreas de trabajo.

En el caso de la maquinaria utilizada para la distribución de fertilizantes y pesticidas (abonadoras, pulverizadores y atomizadores) se han considerado dos situaciones: que la máquina vaya cargada (de fertilizante o producto fitosanitario), en cuyo caso el consumo de carburante será superior al que se produce cuando la máquina termina la operación de cultivo y vuelve de nuevo al almacén sin carga. El consumo de carburante considerado cuando la máquina vuelve sin carga se ha considerado que es igual al que se ha tenido en cuenta para el desplazamiento hasta la parcela del resto de maquinaria que interviene en el cultivo. En ambas situaciones se ha establecido un consumo de gasóleo “medio”. En el caso de la sembradora, que presenta necesidades energéticas mayores, se ha considerado un consumo de gasóleo máximo, tanto si la máquina va cargada como si vuelve tras la siembra sin carga.

Para finalizar con el subsistema **cultivo**, además de lo ya mencionado, cabe señalar que se han tenido en cuenta las cargas energéticas derivadas de la producción de semilla de siembra para la implantación del cultivo.

Para incluir este parámetro en el balance energético, todas las cargas energéticas de la producción de biomasa se han calculado para una superficie de 1,009 hectáreas, es decir, contemplando una superficie adicional de 0,009 hectáreas que representa la extensión necesaria para producir la cantidad de semilla de siembra para 1 hectárea de cardo. Este valor se ha estimado teniendo en cuenta que el rendimiento en semilla es del 10% del rendimiento total obtenido de biomasa (Fernández, 1998) en la campaña de instauración del cultivo y que las labores agrícolas necesarias para la producción de la semilla son las mismas que las contempladas para la producción de biomasa.

3.2.3. Subsistema transporte

Respecto al **transporte**, se ha considerado lo siguiente:

- El acopio y traslado de la biomasa picada cosechada se efectúa mediante un conjunto tractor-remolque de 8 metros de longitud, 2,10 metros de anchura, 2 metros de altura (con un volumen de 33,60 m³) que puede transportar un peso máximo de 12.000 kilogramos (IDAE, 2005).
- El radio máximo de recolección de la biomasa procedente del cultivo del cardo económicamente viable es de 25 kilómetros (Domínguez y Marcos, 2000).

El conjunto tractor-remolque realiza el siguiente recorrido:

- Traslado del conjunto tractor-remolque desde la parcela donde se haya instaurado el cultivo hasta la planta peletizadora con carga (25 kilómetros): constituiría el viaje de ida.
- Traslado del conjunto tractor-remolque desde la planta peletizadora hasta el almacén de la finca sin carga (25 kilómetros). Sería el viaje de vuelta.

Si se tiene en cuenta la variación de rendimientos que existe entre la campaña de implantación del cultivo y las restantes, y la densidad del producto cosechado (se ha considerado que es de unos 100 kg/m³)¹⁰, el recorrido se realiza en dos ocasiones durante la campaña de implantación del cultivo, y en cuatro durante el resto de campañas que existan hasta completar

¹⁰ Valor promedio de los valores de densidad de la paja y los forrajes sueltos recogidos por Ortiz-Cañavate (2003): entre 40-60 kg/m³ y 150 kg/m³.

el ciclo vital del cultivo, sin que en ninguno de los casos se supere el peso máximo que puede transportar el camión.

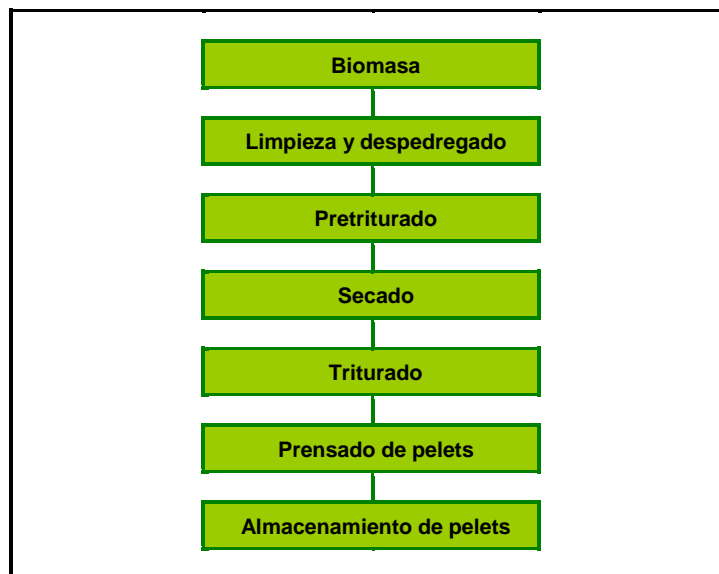
Como se recoge en la Tabla 1, el rendimiento considerado en la primera campaña de cultivo del cardo es de 5,41 t/ha, lo que justifica que la producción obtenida sea transportada en dos trayectos, cada uno de ellos con la mitad de la producción obtenida (2,705 t/ha). Asimismo, a partir del segundo año y en las campañas siguientes, el rendimiento es el doble (10,82 t/ha) por lo que la biomasa debe ser transportada en cuatro trayectos, cada uno de ellos con la cuarta parte de la producción total obtenida (2,705 t/ha).

Para todos los trayectos del conjunto tractor-remolque se han considerado consumos “medios” de gasóleo, tanto en el caso de que el remolque vaya cargado como en el caso de que vaya vacío. Al igual que en el subsistema cultivo, se considera que la energía invertida en el transporte es la contenida en el gasóleo consumido durante éste teniendo en cuenta que 1 litro de gasóleo libera 42,47 MJ.

3.2.4. Subsistema transformación

Se establece que el subsistema consta de los procesos representados en la Figura 1 (Fernández, 2006b).

Figura 1 Procesos que incluye el subsistema de transformación de pelets.



Fuente: Elaboración propia a partir de Fernández (2006b).

Los gastos energéticos realizados durante las distintas fases del proceso se han estimado teniendo en cuenta que la energía primaria total requerida para la producción de pelets representa el 15% de la energía primaria total contenida en los mismos. Del 15% total, la etapa de pretriturado requiere un 1% de la energía contenida en el pelet, la de secado un 10%, la de triturado un 2% y la de prensado un 2% (Fernández, 2006b).

Los consumos energéticos necesarios para la limpieza y despedregado de la biomasa, así como para el almacenamiento de los pelets se consideran insignificantes respecto a los del resto de actividades que componen el proceso de peletización, por lo que no se han incluido en los cálculos.



Finalmente, respecto al subsistema **transformación**, así como en cuanto a la **producción de energía a partir de pelets de biomasa procedente del cardo**, se ha considerado un poder calorífico del pelet de cardo de 3.293,28 kcal/kg de biomasa¹¹.

¹¹ Dato obtenido de los análisis realizados por SEDEBISA (Secaderos de Biomasa, S.A.) en Puente Genil (Córdoba). La muestra analizada procedía del cardo instaurado en la finca de titularidad pública de la empresa "Somonte".

4. Resultados del estudio

4.1. Subsistema cultivo: requerimientos energéticos para la producción de biomasa de cardo

4.1.1. Requerimientos energéticos de las labores agrícolas mecanizadas

En la Tabla 6 se muestra la cantidad de energía primaria que requiere el cultivo del cardo durante la campaña de implantación. Como ya se ha mencionado, la estimación se ha realizado a partir del itinerario de cultivo considerado y con los consumos energéticos unitarios propuestos por el IDAE para las distintas tareas agrícolas.

Tabla 6 Energía primaria requerida para realizar el itinerario de cultivo durante la campaña de implantación del cardo.

Campaña de instauración del cultivo					
Etapa	Labor	Componente	l gasóleo/ha	MJ/ha	MJ/t biomasa
Presiembra	Preparación del terreno	Subsolador	23,00	985,60	182,18
		Vibrocultivador	6,00	257,11	47,53
	Abonado de fondo	Abonadora centrífuga (aplicación de 600 kg/ha de abono complejo: N-P-K, 8:15:15)	1,50	64,28	11,88
Siembra	Siembra	Sembradora de precisión (siembra 5 kg/ha de semilla: densidad de plantación: 15.000 plantas/ha)	6,50	278,54	51,49
		Rulo	5,00	214,26	39,60
	Tratamiento herbicida	Pulverizador hidráulico (aplicación de 3l/ha de trifluralina (30%) y linurón (10%),)	1,10	47,14	8,71
Crecimiento	Mantenimiento del cultivo (aclareo)	Cultivador de brazos	6,00	257,11	47,53
Recolección	Recolección	Cosechadora picadora de maíz	27,00	1.157,01	213,87
		Remolque autocargador	1,50	64,28	11,88
TOTAL			77,60	3.325,33	614,66

Para el cálculo del consumo energético se han utilizado los valores unitarios de consumo de gasóleo de cada labor agrícola definidos por el IDAE (2005) y un factor de conversión de 42,47 MJ/l de gasóleo, que incluye el consumo energético de su producción y transporte. Asimismo, se ha tenido en cuenta un rendimiento en biomasa de 5,41t biomasa/ha (ver Tabla 1) y el factor de producción de semilla de 1,009.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del IDAE (2005).

En la Tabla 7 se muestra la estimación de la energía primaria empleada por campaña en las campañas posteriores a la de implantación del cultivo que completarían el ciclo.

Tabla 7 Energía primaria requerida para llevar a cabo el itinerario de cultivo durante las campañas posteriores a la instauración del cultivo.

Campañas posteriores					
Etapa	Labor	Componente	l gasóleo/ha	MJ/ha	MJ/t biomasa
Crecimiento	Mantenimiento del cultivo (aclareo)	Cultivador de brazos	6,00	257,11	23,76
Recolección	Recolección	Cosechadora picadora de maíz	36,00	1.542,68	142,58
		Remolque autocargador	2,50	107,13	9,90
TOTAL (por campaña o año)			44,50	1.906,92	176,24

Para el cálculo del consumo energético se han utilizado los valores unitarios de consumo de gasóleo de cada labor agrícola definidos por el IDAE (2005) y un factor de conversión de 42,47 MJ/l de gasóleo, que incluye el consumo energético de su producción y transporte. Asimismo, se ha tenido en cuenta un rendimiento en biomasa de 10,82 t biomasa/ha (ver Tabla 1) y el factor de producción de semilla de 1,009.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del IDAE (2005).

La Tabla 8 recoge la energía primaria total requerida para realizar las labores agrícolas que comprenden el ciclo de vida completo del cardo, que, como se ha mencionado, se ha considerado que es de ocho años.

Tabla 8 Energía primaria total empleada en las labores mecanizadas de cultivo del cardo durante su ciclo vital (ocho años).

Energía primaria total empleada en las labores agrícolas (MJ/t biomasa)		
Año 1: Campaña de instauración del cultivo		614,66
Año 2-8: Campañas posteriores		Por campaña
		Total (siete campañas o años)
		176,24
		1.233,68
TOTAL	Ciclo completo de cultivo (ochos campañas o años)	1.848,35
	Por campaña o año	231,04

La energía primaria total empleada en las labores agrícolas del ciclo completo de cultivo (ocho años) se ha calculado sumando la energía primaria total empleada en las labores agrícolas de la campaña de instauración del cultivo y la total de las siete campañas siguientes. Asimismo, la energía primaria total empleada en las labores agrícolas por año se ha calculado dividiendo la energía primaria total empleada en las labores agrícolas del ciclo completo de cultivo entre ocho, número de años considerado como vida media útil del cardo.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2. Requerimientos energéticos para la producción, envasado y transporte de los insumos (fertilizantes y herbicidas)

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de la estimación de la energía primaria requerida para la producción, envasado y transporte de los insumos utilizados en el cultivo (fertilizantes y herbicidas).

En lo que atañe a los fertilizantes, se ha considerado que las necesidades del cultivo se cubren con 600 kg/ha de abono complejo N-P-K 8:15:15, por lo que la energía primaria estimada se ha calculado como la suma de la energía necesaria para la producción, envasado y transporte del nitrógeno, fósforo y potasio fertilizantes en las proporciones pertinentes. En la Tabla 9 se muestran los resultados de los cálculos realizados.

Tabla 9 Energía primaria requerida para la producción, envasado y transporte de los fertilizantes (nitrógeno, fósforo y potasio) empleados en el cultivo del cardo.

Energía requerida para la producción, envasado y transporte de fertilizantes		MJ/kg fertilizante	MJ/ha	MJ/t biomasa
Nitrógeno fertilizante	Producción	69,53	3.337,44	622,45
	Envasado	2,60	124,80	23,28
	Transporte	4,50	216,00	40,29
	TOTAL	76,63	3.678,24	686,02
Fósforo fertilizante	Producción	7,70	304,92	56,87
	Envasado	2,60	102,96	19,20
	Transporte	5,70	225,72	42,10
	TOTAL	16,00	633,60	118,17
Potasio fertilizante	Producción	6,40	478,08	89,17
	Envasado	1,80	134,46	25,08
	Transporte	4,60	343,62	64,09
	TOTAL	12,80	956,16	178,33
N-P-K (8:15:15)				982,52

Para el cálculo de la energía primaria requerida para la producción de los distintos elementos que componen el abono utilizado se han considerado los valores propuestos por Gellings y Parmenter (2004).

Fuente: Elaboración propia a partir de Gellings y Parmenter (2004).

De la tabla anterior cabe destacar que mientras que los requerimientos energéticos para la producción, el envasado y el transporte del fósforo y potasio fertilizante suponen aproximadamente el 49%, 15% y 36% del total de cada uno, en el caso del nitrógeno fertilizante, estos suponen el 91%, 3% y 6% respectivamente.

Por otro lado, la Tabla 10 recoge el consumo de energía primaria requerida para la producción de los dos componentes del tratamiento herbicida empleado en el cultivo. En concreto, la pulverización de una dosis de 3 l/ha de trifluralina (30%) y linurón (10%) durante la fase de siembra.

Tabla 10 Energía primaria requerida para la producción, envasado y transporte del tratamiento herbicida empleado en el cultivo del cardo.

Componentes tratamiento herbicida	Energía primaria requerida por componente (MJ/kg)	Cantidad componentes (kg)	Energía primaria requerida por componente (MJ/kg)
Trifluralina (30%)	265,00	0,90	238,50
Linurón (10%)		0,30	79,50
Energía primaria total requerida por tratamiento herbicida			
	MJ/kg	MJ/ha	MJ/t biomasa
	318,00	320,86	59,31

Para el cálculo de la energía primaria requerida para la producción del herbicida utilizado se ha considerado el valor unitario de 265 MJ/kg de herbicida propuesto por NNFFCC (2008). En el cálculo de la cantidad de cada componente de herbicida utilizado se ha considerado una densidad del 1.000 kg/m³.

Fuente: Elaboración propia a partir de NNFFCC (2008).

4.1.3. Requerimientos energéticos para los desplazamientos de la maquinaria agrícola

En la siguiente tabla se muestran los resultados de la estimación de la energía primaria necesaria para desplazar la maquinaria agrícola desde el almacén a la parcela de cultivo, tanto en la campaña de instauración como en las siguientes.

Tabla 11 Energía primaria requerida para los desplazamientos de la maquinaria agrícola desde el almacén a la parcela de cultivo.

Año 1: campaña de instauración del cultivo				
Desplazamientos de maquinaria para la distribución de insumos				
Sembradora	Consumo de gasóleo (l/km)	Distancia almacén-parcela (km)	Consumo de gasóleo (l)	MJ/t
Cargada	0,55	1,00	0,55	7,45
Sin carga	0,39	1,00	0,39	
Abonadora	Consumo de gasóleo (l/km)	Distancia almacén-parcela (km)	Consumo de gasóleo (l)	MJ/t
Cargada	0,52	1,00	0,52	7,05
Sin carga	0,37	1,00	0,37	
Maquinaria para el Tratamiento herbicida	Consumo de gasóleo (l/km)	Distancia almacén-parcela (km)	Consumo de gasóleo (l)	MJ/t
Cargada	0,52	1,00	0,52	7,05
Sin carga	0,37	1,00	0,37	
Desplazamientos del resto de maquinaria agrícola				
Número de labores agrícolas realizadas	Consumo de gasóleo (l/km)	Distancia almacén-parcela (km)	Consumo de gasóleo (l)	MJ/t
6,00	0,37	2,00	5,18	35,17

TOTAL (CAMPAÑA DE INSTAURACIÓN DEL CULTIVO)	56,71
--	--------------

Años 2-8: campañas posteriores a la implantación del cultivo				
Desplazamientos de maquinaria agrícola (por campaña)				
Número de labores agrícolas realizadas	Consumo de gasóleo (l/km)	Distancia almacén-parcela (km)	Consumo de gasóleo (l)	MJ/t
3,00	0,37	2,00	2,22	8,79
TOTAL (SIETE CAMPAÑAS O AÑOS)				61,55
Ciclo completo de cultivo (ocho campañas o años)				
				118,26

Para el cálculo del consumo energético se han utilizado los valores unitarios de consumo de gasóleo de los desplazamientos definidos por el IDAE (2005) y un factor de conversión de 42,47 MJ/l de gasóleo, que incluye el consumo energético de su producción y transporte. Asimismo, se ha tenido en cuenta los rendimientos en biomasa recogidos en la Tabla 1 y el factor de semilla de 1,009.

Fuente: Elaboración propia a partir de IDAE (2005).

4.1.4. Subsistema cultivo: síntesis de resultados

En la Tabla 12 se muestra de forma sintética el consumo energético que produce cada uno de los elementos que componen el subsistema **cultivo**, así como su contribución relativa al consumo de energía primaria total.

Tabla 12 Energía primaria total necesaria para la producción de biomasa procedente del cardo.

	MJ/t	Contribución respecto a los subapartados (%)	Contribución respecto al total (%)
Labores agrícolas	614,66	100,00%	20,43%
Subsolador	182,18	29,64%	6,06%
Vibrocultivador	47,53	7,73%	1,58%
Abonado de fondo (Abonadora centrífuga; abono complejo NPK, 8:15:15, 600 kg/ha)	11,88	1,93%	0,39%
Siembra (Sembradora de precisión; semilla: 5 kg/ha, 15.000 plantas/ha)	51,49	8,38%	1,71%
Rulo	39,60	6,44%	1,32%
Tratamiento herbicida (pulverizado de una mezcla de trifluralina (30%) y linurón (10%))	8,71	1,42%	0,29%
Cultivador de brazos	47,53	7,73%	1,58%
Cosechadora picadora de maíz	213,87	34,79%	7,11%
Remolque autocargador	11,88	1,93%	0,39%
Producción, envasado y transporte de insumos	1.041,83	100,00%	34,63%
Fertilizantes	982,52	94,31%	32,66%

	Nitrógeno	686,02	65,85%	22,80%	
	Fósforo	118,17	11,34%	3,93%	
	Potasio	178,33	17,12%	5,93%	
	Herbicidas	59,31	5,69%	1,97%	
	Desplazamientos de maquinaria agrícola e insumos	56,71	100,00%	1,89%	
	TOTAL	1.713,20	100,00%	56,95%	
Campanías siguientes	Total campanías (siete)	Labores agrícolas	1.233,68	100,00%	41,01%
		Cultivador de brazos	166,34	13,48%	5,53%
		Cosechadora picadora de maíz	998,04	80,90%	33,17%
		Remolque autocargador	69,31	5,62%	2,30%
		Desplazamientos de maquinaria agrícola	61,55	100,00%	2,05%
		TOTAL	1.295,23	100,00%	43,05%
TOTAL		3.008,43	100,00%	100,00%	

Fuente: Elaboración propia.

Las labores agrícolas a realizar para la instauración y desarrollo del cultivo son los procesos que contribuyen en mayor grado al consumo de energía durante la producción de biomasa: la suma del consumo energético de las labores realizadas en la campaña de instauración del cultivo y el de las labores llevadas a cabo en las campañas posteriores supone el 61,44% del consumo total de energía primaria para la producción de biomasa procedente del cardo.

Continuando con la campaña de instauración del cultivo, la producción, envasado y transporte de los insumos utilizados suponen el 34,63% del gasto energético total del cultivo de cardo para producción de pelets. Respecto a los fertilizantes utilizados en el abonado de fondo, su producción, envasado y transporte suponen el 32,66% del consumo total de energía primaria del subsistema considerado (**cultivo**). De los tres elementos fertilizantes principales, es el N el que mayor energía primaria necesita para su producción, envasado y transporte, prácticamente un 66,00% del total del conjunto de insumos.

Respecto al consumo energético necesario para la producción de los herbicidas utilizados durante la siembra del cardo, cabe señalar que apenas supone un 1,97% del total necesario para la producción de biomasa.

Finalmente, en cuanto a los desplazamientos de la maquinaria agrícola desde el almacén de la finca hasta la parcela donde se haya instaurado el cardo, cabe señalar que suponen un 3,93% del consumo total de energía primaria del subsistema **cultivo**.

4.2. Subsistema transporte: requerimientos energéticos para el transporte de la biomasa a la planta peletizadora

Seguidamente, en la Tabla 13 se muestran los resultados para el segundo de los subsistemas en estudio.

Tabla 13 Energía primaria requerida para el transporte de la biomasa procedente del cardo desde la parcela hasta la planta peletizadora.

Año 1: campaña de instauración del cultivo						
Número de viajes	Etapas de transporte	Consumo de gasóleo (l/km)	Distancia (km)	Consumo de gasóleo (l)		MJ/t
2	Parcela – planta peletizadora (con carga)	0,52	25,00	13,00	43,50	344,56
	Planta peletizadora – almacén (sin carga)	0,35	25,00	8,75		
Años 2-8: campañas posteriores a la implantación del cultivo						
Por campaña						
Número de viajes	Etapas de transporte	Consumo de gasóleo (l/km)	Distancia (km)	Consumo de gasóleo (l)		MJ/t
4	Parcela – planta peletizadora (con carga)	0,52	25,00	13,00	87,00	344,56
	Planta peletizadora – almacén (sin carga)	0,35	25,00	8,75		
Total (siete campañas o años)						
2.411,92						
Ciclo completo de cultivo						
2.756,48						

Para el cálculo del consumo energético se han utilizado los valores unitarios de consumo de gasóleo para el transporte definidos por el IDAE (2005) y un factor de conversión de 42,47 MJ/l de gasóleo, que incluye el consumo energético de su producción y transporte. Asimismo, se ha tenido en cuenta los rendimientos en biomasa recogidos en la Tabla 1 y el factor de semilla de 1,009.

Fuente: Elaboración propia a partir de IDAE (2005).

4.3. Subsistema transformación: requerimientos energéticos para la producción de pelets de biomasa procedente del cardo

Teniendo en cuenta la metodología y los supuestos e hipótesis de partida comentados anteriormente en relación al subsistema **transformación**, en la Tabla 14 se presenta la energía primaria que requeriría este subsistema.

Tabla 14 Energía primaria requerida para la producción de pelets de biomasa procedente de cardo.

Energía primaria requerida para la producción de pelets de biomasa procedente del cardo por año o campaña		
Etapas	MJ/t biomasa	Total
Limpieza y despedregado	---	2.068
Pretriturado	138	
Secado	1.379	
Triturado	276	
Prensado de pelets	276	
Almacenamiento de pelets	---	

Para el cálculo de la energía consumida en el subsistema transformación se ha considerado que el poder calorífico del pelet de cardo es igual a 3.293,28 kcal/kg¹² y que la energía primaria total requerida para la producción de pelets representa el 15% de la energía primaria total contenida en los mismos (pretriturado: 1%; secado: 10%; triturado: 2%; prensado: 2% (Fernández (2006b)).

Fuente: Elaboración propia.

La energía primaria necesaria para la producción de pelets de biomasa procedente de cardo durante un año es de 2.068 MJ/t biomasa. Así, durante el ciclo vital considerado para el cultivo (ocho años), la energía primaria requerida es de 16.543 MJ/t biomasa. Cabe destacar que el proceso que requiere mayor consumo energético es el secado, que supone un 67,00% de la energía total requerida para el proceso.

¹² Dato obtenido de los análisis realizados en SEDEBISA (Secaderos de Biomasa, S.A.) en Puente Genil (Córdoba). La muestra analizada procedía del cardo instaurado en la finca de titularidad pública de la empresa "Somonte".

4.4. Energía primaria total utilizada para la producción de pelets a partir de cardos: síntesis de resultados

En la siguiente tabla se sintetizan todos los aportes energéticos necesarios para la producción de pelets de biomasa procedente de cardo, asignadas en función de cada subsistema.

Tabla 15 Aportes energéticos totales para la producción de pelets de biomasa procedente de cardo durante su ciclo completo de cultivo.

Subsistemas		MJ/t biomasa (ciclo completo)	MJ/t biomasa (por año o campaña)	Contribución respecto al total (%)
CULTIVO	Campaña de instauración del cultivo	1.713,20	376,05	13,49%
	Campañas posteriores	1.295,23		
	TOTAL	3.008,43		
TRANSPORTE		2.756,48	344,56	12,36%
TRANSFORMACIÓN		16.542,80	2.067,85	74,16%
TOTAL		22.307,71	2.788,46	100,00%

Fuente: Elaboración propia.

El proceso productivo de pelets (subsistema **transformación**) es la actividad que mayor energía primaria requiere en el sistema considerado. En concreto, supone el 74,16% de la energía primaria total consumida. Respecto a los restantes subsistemas considerados, **cultivo** y **transporte**, cabe indicar que suponen el 13,49% y 12,36% de la energía primaria total respectivamente.

5. Eficiencia energética de la producción de pelets de cardo

Tras la estimación del consumo energético de las etapas que integran el proceso de producción de pelets de biomasa de cardo, en la Tabla 16 presentan los resultados obtenidos del análisis de la eficiencia energética del sistema considerado (balance energético), calculada como la relación entre la energía producida y la consumida. Asimismo, se ha calculado la producción neta de energía, restando la energía consumida a la producida por el sistema.

Tabla 16 Eficiencia energética del proceso de producción de pelets de biomasa procedente del cultivo del cardo (por año o campaña).

Eficiencia energética del proceso de producción de pelets de biomasa procedente del cultivo del cardo (por año o campaña)		
Energía consumida (MJ/t biomasa)	Energía producida (MJ/t biomasa)	Producción neta de energía (MJ/t biomasa)
2.788,46	13.785,67	10.997,21
Eficiencia energética del proceso (balance energético)		
4,94		

Fuente: Elaboración propia.

La energía primaria total requerida para la producción de pelets representa el 15% de la energía primaria total contenida en los mismos (Fernández, 2006a). Asimismo, se ha considerado un valor del poder calorífico del pelet de cardo de 3.293,28 kcal/kg (SEDEBISA, Secaderos de Biomasa S.A., 2008).

Fuente: Elaboración propia.

6. Conclusiones

- El **balance energético de la producción de pelets a partir de cardo resulta positivo**, obteniéndose prácticamente cinco veces más energía que la invertida en su cultivo, transporte y transformación. Así, la producción neta de energía por año o campaña se aproxima a los 11.000 MJ/t biomasa.
- Respecto a los requerimientos energéticos del sistema considerado, cabe destacar que es **la producción de pelets el proceso con mayores requerimientos energéticos (subsistema transformación)**. En concreto, supone el 74,16% del consumo de energía primaria total del sistema considerado. En cuanto a este subsistema, el de transformación, cabe señalar que es el proceso de secado de la biomasa procedente del cultivo del cardo el que mayores consumos de energía primaria requiere del conjunto de fases que constituyen el proceso de fabricación de pelets, en concreto, un 67,00%.
- Cabe indicar que el análisis se ha realizado estableciendo un escenario hipotético en el que no se han considerado rendimientos máximos que este cultivo puede alcanzar en determinadas condiciones y entornos. Asimismo, los requerimientos energéticos del proceso de peletización de la biomasa pueden verse reducidos con la utilización de técnicas y procesos energéticamente más eficientes, como por ejemplo, el uso de energía solar para el secado de la biomasa, que empleen una menor cantidad de energía, y que mejoraría el balance energético del sistema estudiado. Teniendo en cuenta estos dos factores, el balance energético y la eficiencia energética del proceso analizado podrían dar un resultado más positivo, si cabe, del que se recoge en el presente documento.
- Finalmente, a falta de un mayor conocimiento de los principales impactos medioambientales generados por el cultivo de esta especie (emisión de gases invernadero, acidificación, eutrofización, etc.), y ciñéndonos exclusivamente a los resultados obtenidos del estudio y análisis de su balance energético, la biomasa de *Cynara cardunculus* resulta una de las materias primas de mayor interés para la producción de pelets. Asimismo, se hace necesario conocer sus potencialidades respecto a otros aprovechamientos como es la

obtención de biodiesel a partir de sus semillas. No obstante, cabe señalar en el caso del cardo, la necesidad de dedicar mayores esfuerzos al estudio y análisis de la forma de superar ciertos obstáculos de carácter técnico para su utilización, como las dificultades que presenta su uso en calderas debido a los resultados de su valorización energética: la biomasa extraída de su cultivo presenta un alto contenido en cloro, hecho que provoca emisiones, como por ejemplo dioxinas, y corrosión de las calderas. Una de las posibles alternativas es su mezcla con otros tipos de biomasa, o la utilización de sobrecalentadores de titanio, si bien, este último tratamiento es excesivamente caro e incrementa notablemente los costes económicos del proceso.

Bibliografía

- Domínguez, J., Marcos, M. J. (2000). "GIS applied to evaluate biomass power in Andalucía (Spain)". *Cybergeo. European Journal of Geography*. Nº 142. 14. p. ISSN. 1278-3366.
- Fernández, J. (2006a). "El cardo, un cultivo de secano para producción de biocombustibles". *Vida Rural*. Nº 240, pp 44-47. ISSN. 113-8938.
- Fernández, J. (2006b). "Materias primas para producción de biocombustibles sólidos". *Jornadas Energías Renovables, Ávila*.
- Fernández, J. (1998). Capítulo "Cultivos energéticos para la Península Ibérica" en "Los cultivos no alimentarios como alternativa al abandono de tierras". Ed. Agrícola España.
- IDAE (2005). "Consumos energéticos en las operaciones agrícolas en España". Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (actualmente Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino) y Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.
- IEA (2007). "Manual de Estadísticas Energéticas". Agencia Internacional de la Energía (OCDE – EUROSTAT).
- NNFCC (2008). "Environmental Assessment Tools for Biomaterials (NF0614)". National Non-Food Crops Centre (<http://www.nnfcc.co.uk/>).
- Ortiz-Cañavate, J. (2003). "Las máquinas agrícolas y su aplicación". 6ª edición. Editorial Mundi-Prensa, S.A.
- West, T. O., Marland G. (2001). "A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States". *Agriculture, Ecosystems and Environment*. Nº 91 (2002), pp 217-232. ISSN. 0167-8809.
- Gellings, C. W., Parmenter, K. E. (2004). Capítulo "Energy efficiency in fertilizer production and use" en "Efficient Use and Conservation of Energy". Editorial EOLSS Publishers Co Ltd.