

Balance de emisiones de GEI procedentes de la producción y el uso de pelets de *Cynara cardunculus* con fines térmicos

Abril de 2010

La Secretaría General del Medio Rural y Producción Ecológica ha sido la encargada de la coordinación y la dirección facultativa del presente estudio.

Alejandro Sanz Pagés, María Teresa López Toledano, José Antonio Callejo López y Teresa Parra Heras, del Área de Estudios y Prospectiva de la Empresa Pública Desarrollo Agrario y Pesquero, se han encargado de su elaboración.

Balance de emisiones de GEI procedentes de la producción y el uso de pelets de *Cynara cardunculus* con fines térmicos

1. Antecedentes	4
2. Objetivos y estructura del estudio	5
3. Metodología del estudio	7
3.1. <i>Consideraciones previas</i>	7
3.2. <i>Método de cálculo</i>	8
4. Resultados del estudio	22
4.1. <i>Emisiones procedentes del cultivo de las materias primas (e_{ec})</i>	22
4.2. <i>Emisiones procedentes de la transformación (e_p)</i>	31
4.3. <i>Emisiones procedentes del transporte y distribución (e_{td})</i>	31
4.4. <i>Reducción de emisiones procedente de la acumulación de carbono en suelo mediante una mejora de la gestión agrícola (e_{sca})</i>	33
5. Emisiones totales de GEI procedentes del uso de pelets de cardo	34
6. Reducción de emisiones de GEI procedentes del uso de pelets de cardo	38
7. Conclusiones	39
Bibliografía	41

Balance de emisiones de GEI procedentes de la producción y el uso de pelets de *Cynara cardunculus* con fines térmicos

1. Antecedentes

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

El fomento del uso de energías procedentes de fuentes renovables, junto con el ahorro energético y una mayor eficiencia energética, son líneas estratégicas fundamentales para lograr la reducción de las emisiones de GEI y cumplir el Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, así como otro conjunto de compromisos nacionales, europeos e internacionales relacionados con la reducción de las emisiones de GEI más allá del año 2012.

En este sentido, el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC considera que el conjunto de las prácticas agrícolas puede contribuir significativamente a la mitigación del cambio climático a través del aumento de la capacidad de los suelos como sumideros de carbono, la reducción de las emisiones de GEI y la producción de biocombustibles para usos energéticos. Por lo tanto, el sector agrícola (y ganadero) debe contemplarse desde una triple vertiente: como sector emisor, como sector que ofrece la posibilidad de incrementar los sumideros, y como sector productor de un combustible neutro en cuanto a las emisiones de CO₂. En relación a este último aspecto, son numerosos los estudios que ponen de manifiesto que la utilización de biocombustibles presenta un balance neutro de emisiones de CO₂ ya que las emisiones generadas en su combustión son iguales a las captadas por la planta durante su crecimiento. En este sentido, la principal ventaja de su utilización radica en las emisiones que se evitan al sustituir a combustibles fósiles. Asimismo, en el caso de la biomasa lignocelulósica, las emisiones de otros contaminantes, como azufre, nitrógeno y cloro, son inferiores a las de los combustibles fósiles. No obstante, para el conjunto de biocombustibles, se debe tener en cuenta las emisiones de GEI generadas en su producción como consecuencia del uso de combustibles sólidos y fertilizantes, por lo que resulta necesaria la realización de estudios y análisis que establezcan y profundicen en el balance real de dichas emisiones.

Desde una perspectiva estratégica y de seguridad en el abastecimiento, el uso de biocombustibles contribuye a la disminución de la dependencia externa de abastecimiento de energía. Desde un punto de vista medioambiental, se convierte en una medida justificada para proteger el clima y luchar contra el cambio climático. Por ello, y considerando que contribuye a

la reducción de las emisiones de GEI durante su ciclo de vida, se ha de valorar su potencial desarrollo en diversos sectores demandantes de energía, como por ejemplo el de la calefacción.

El uso de la biomasa tanto en calefacciones de viviendas unifamiliares, como en calefacciones centralizadas de edificios o en redes de calefacción centralizadas (calefacción de distrito), es una alternativa al consumo de gas y otros combustibles sólidos. Este tipo de instalaciones con biomasa generan un ahorro, derivado del menor consumo de energía, superior al 10% respecto al uso de combustibles fósiles, pudiendo alcanzar niveles mayores en función del tipo de biomasa, la localidad y el combustible fósil sustituido. Este hecho se explica si se tiene en cuenta que los combustibles fósiles (gas natural) o derivados de ellos (gasóleo) han de ser extraídos en lugares muy lejanos, ser transportados, transformados y bombeados antes de llegar al punto de consumo, consumiendo todas estas operaciones gran cantidad de energía (IDAE, 2007).

Tras conocer el balance energético de la producción y el uso de pelets de biomasa de cardo¹, el presente estudio pretende analizar el balance de las emisiones de GEI derivado de la producción y el uso para calefacción del pelet fabricado a partir de cardo, así como la reducción de los GEI emitidos como consecuencia de la sustitución del combustible usado como referencia, que en este estudio es el gasóleo C. Para realizar el estudio se ha tenido en cuenta la metodología propuesta en la **Directiva 2009/28/CE**², que permite cuantificar el impacto de los biocarburantes, otros biolíquidos y los combustibles fósiles de referencia en las emisiones de GEI.

Por último, cabe señalar que el estudio realizado 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 Climático³. El Plan, que se estructura en tres programas referidos a la Mitigación, Adaptación y Comunicación, tiene entre sus objetivos la mejora en el conocimiento sobre las emisiones y captaciones de GEI asociados a la agricultura y pesca, propósito que presenta el estudio realizado.

2. Objetivos y estructura del estudio

Como ya se ha comentado en el apartado precedente, tras estimar el balance energético de la producción y el uso de pelets de cardo, se quiere ahora determinar el balance de las emisiones

¹ En febrero de 2009 la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía publicó el estudio "Balance energético de la producción de pelets a partir de *Cynara cardunculus*" en el que se estima el balance energético de la producción de pelets a partir de biomasa procedente de cardo, considerando el ciclo completo del proceso (http://www.cap.junta-andalucia.es/agriculturaypesca/portal/opencms//portal/DGPAgraria/Estudios_Prospectiva/Estudios_Informes/estudios_a_groambientales/balance_cardo?entrada=servicios&servicio=851).

² La **Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE** es una norma que forma parte del conjunto de medidas con la que la UE pretende avanzar y progresar en política energética y reducir las emisiones de efecto invernadero, alcanzando una cuota del 20% de energía procedente de fuentes renovables en el consumo de energía y una cuota del 10% de energía procedente de fuentes renovables en el consumo de combustibles para el transporte en la Comunidad para 2020.

³ 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).

de GEI derivadas de este sistema para conocer su impacto medioambiental, en particular, en qué grado contribuye al calentamiento global de la atmósfera.

El **objetivo general** que se persigue es **estudiar el balance de las emisiones totales de GEI procedentes de la producción y el uso de pelets de biomasa de cardo con fines térmicos**.

Como **objetivos específicos** cabe mencionar los siguientes:

- Cuantificar las emisiones y captaciones de GEI derivadas de los diferentes procesos que componen el sistema de producción y uso de pelets de cardo.
- Identificar qué procesos generan mayores emisiones de GEI y cuáles suponen mayores ahorros de emisiones.
- Analizar la reducción de emisiones de GEI procedentes de la producción y el uso de pelets de cardo con fines térmicos derivada de la sustitución del combustible de referencia (gasóleo C).

Para dar respuesta a los objetivos planteados en el estudio, el documento se ha estructurado en varios capítulos, aparte del precedente y éste que nos ocupa.

Primeramente, se presenta la metodología utilizada para la realización del estudio, recogiendo los supuestos e hipótesis de partida. En concreto, se exponen las consideraciones previas establecidas y se describe el método de cálculo de las emisiones de GEI procedentes de la producción y el uso del biocombustible sólido estudiado (pelets de cardo), así como de la reducción de emisiones de GEI derivada de la sustitución del combustible fósil de referencia, en este caso gasóleo C.

En este sentido, y como se podrá observar en los apartados siguientes, el análisis de las emisiones de GEI derivadas de la producción y el uso de pelets de cardo se ha llevado a cabo atendiendo a la metodología descrita en el **Anexo V, parte C, de la Directiva 2009/28/CE**⁴. En él, se establecen las normas para calcular el impacto de los biocarburantes, otros biolíquidos y los combustibles fósiles de referencia en las emisiones de GEI⁵. En particular, contempla las emisiones totales procedentes del cultivo de la materia prima, las emisiones anualizadas procedentes de las modificaciones en las reservas de carbono causadas por el cambio en el uso del suelo, las emisiones procedentes de la transformación, las emisiones procedentes del transporte y distribución, y las emisiones procedentes del combustible cuando se utiliza. Asimismo, considera la reducción de las emisiones procedente de la acumulación de carbono en suelo mediante una mejora de la gestión agrícola, la reducción de emisiones procedente de la captura y almacenamiento geológico del carbono, la reducción de emisiones procedente de la captura y sustitución del carbono, y la reducción de emisiones procedentes de la electricidad excedentaria de la cogeneración.

Posteriormente, se presentan los resultados obtenidos para las distintas fuentes de emisión y/o absorción de GEI. Analizados los resultados, se determina el balance de las emisiones totales

⁴ <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:ES:PDF>.

⁵ Como se comenta más adelante en el apartado de metodología, la directiva no hace alusión a los biocombustibles sólidos extraídos de biomasa lignocelulósica, como es el caso de los pelets de cardo, objeto de estudio del presente documento. No obstante, dada la analogía con los biocarburantes, se ha aplicado dicha metodología. En este sentido, en la directiva se indica que antes del 31 de diciembre de 2009, la Comisión establecerá los requisitos de un sistema de sostenibilidad para los usos energéticos de la biomasa, distintos de los biocarburantes y biolíquidos. Éstos se basarán en la información científica disponible, teniendo en cuenta la innovación desarrollada en este ámbito.

y la reducción de GEI de la producción y el uso de este tipo de biocombustible. Finalmente, en el último apartado, se presentan las conclusiones del estudio.

3. Metodología del estudio

3.1. Consideraciones previas

En el presente capítulo se exponen las consideraciones que se han tenido en cuenta en la estimación de las emisiones de GEI procedentes de la producción y el uso de pelets de cardo como biocombustible con fines térmicos, y que son análogas a las establecidas en el estudio “Balance energético de la producción de pelets a partir de *Cynara cardunculus*” (CAP, 2009).

- El cardo es un cultivo plurianual cuya vida media útil se estima entre 7 y 10 años (Fernández, 1998). En el 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 parcela donde se cultiva 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 (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 considerado ha sido el 80% del máximo establecido (Tabla 1).

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 (campaña de instauración del cultivo)	13,52	40%	5,41
Años 2-8 (campañas siguientes)		80%	10,82

Fuente: Elaboración propia.

Los rendimientos en biomasa que se recogen en la tabla anterior son los que se han empleado para llevar a cabo el estudio de las emisiones totales y la reducción de GEI procedentes de la producción y el uso de pelets de cardo con fines térmicos⁶.

- Se ha considerado que el rendimiento en la transformación de la biomasa de cardo en pelets es del 100%, es decir, la biomasa total de cardo que se extrae del cultivo es transformada en pelets.
- Se ha considerado un poder calorífico del pelet de cardo de 3.293,28 kilocalorías por kilogramo de pelets de cardo, equivalente a 13.787 megajulios por tonelada de pelets de cardo⁷, con una humedad del 7,69%.

⁶ Según lo considerado, el rendimiento medio del cultivo del cardo a lo largo de su ciclo completo será igual a 10,15 t biomasa/ha año, con una humedad del 15%.

⁷ 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 “Somonte” que gestiona la Empresa Pública DAP.

- Atendiendo a la metodología que se detalla en el **Anexo V, parte C, de la Directiva 2009/28/CE**, los resultados del estudio se expresan en gramos equivalentes de CO₂ por megajulio de combustible (gCO₂eq/MJ), para lo cual en el desarrollo de sus cálculos se han empleado diferentes factores para la transformación de las unidades.

3.2. Método de cálculo

El análisis de las emisiones de GEI procedentes de la producción y el uso de pelets a partir de *Cynara cardunculus* se ha realizado siguiendo las líneas metodológicas descritas en el **Anexo V, parte C, de la Directiva 2009/28/CE**.

En él, se recoge que las **emisiones de GEI procedentes de la producción y el uso de combustibles de transporte, biocombustibles y biolíquidos**, expresados en gramos equivalentes de CO₂ por megajulio de combustible (gCO₂eq/MJ) se calculan atendiendo a la siguiente fórmula:

$$E = e_{ec} + e_l + e_p + e_{td} + e_u - e_{sca} - e_{ccs} - e_{ccr} - e_{ee}$$

siendo,

- **E: emisiones totales procedentes del uso del combustible.**
- **e_{ec}: emisiones procedentes de la extracción o del cultivo de las materias primas,** que incluyen las emisiones de GEI procedentes del proceso de cultivo, las derivadas de la recogida de las materias primas, residuos y pérdidas, y las resultantes de la producción de insumos utilizados en la fase de cultivo. No se tiene en cuenta la captura de CO₂ por el cultivo de la materia prima (planta de cardo en nuestro estudio).
- **e_l: emisiones anualizadas de GEI procedentes de las modificaciones en las reservas de carbono causadas por el cambio en el uso del suelo,** expresadas como masa equivalente de CO₂ por unidad de energía producida por el biocarburante, se calculan dividiendo las emisiones totales por igual a lo largo de 20 años. Se cuantifican aplicando la siguiente fórmula:

$$e_l = (CS_R - CS_A) \times 3,664 \times 1/20 \times 1/P - e_B$$

siendo,

- **e_l**, las **emisiones anualizadas de GEI procedentes de las modificaciones en las reservas de carbono causadas por el cambio de uso del suelo**, expresadas como masa equivalente de CO₂ por unidad de energía producida por el biocarburante.
- **CS_R**, las **reservas de carbono por unidad de superficie asociadas al uso del suelo de referencia**, expresadas como masa de carbono por unidad de superficie, incluidos tanto el suelo como la vegetación. El uso del suelo de referencia es el uso del suelo en enero de 2008, o bien 20 años antes de que se obtuvieran las materias primas si esta fecha es más reciente.
- **CS_A**, las **reservas de carbono por unidad de superficie asociadas al uso del suelo real**, expresadas como masa de carbono por unidad de superficie, incluidos

tanto el suelo como la vegetación. En los casos en que las reservas de carbón se acumulen durante un periodo superior a un año, el valor de CS_A será el de las reservas estimadas por unidad de superficie después de 20 años, o cuando el cultivo alcance madurez, si esta fecha es más reciente.

- **3,664 (emisiones de CO₂ equivalente/emisiones de C equivalente)**, factor utilizado para convertir las emisiones de C equivalente en emisiones de CO₂ equivalente⁸.
- **P, productividad de los cultivos**, medida como la energía producida por los biocarburantes y otros biolíquidos por unidad de superficie al año.
- **e_B, prima de 29 gramos de CO₂ equivalente/megajulio** para el biocombustible u otro biolíquido cuya biomasa se obtiene de tierras degradadas restauradas, siempre que se demuestre que la tierra en cuestión no era explotada para la agricultura o cualquier otra actividad en enero de 2008, y que además se trate de, o bien “tierras gravemente degradadas”, incluidas las tierras anteriormente explotadas con fines agrícolas, o bien “tierras altamente contaminadas”⁹.

La prima se aplicará durante un periodo máximo de 10 años a partir de la fecha de la reconversión de la tierra en explotación agrícola, siempre que se garantice un crecimiento regular de las reservas de carbono así como una reducción importante de la erosión para las tierras incluidas en la categoría de “tierras gravemente degradadas” y que se reduzca la contaminación del suelo para las tierras incluidas en la categoría “tierras altamente contaminadas”.

En relación a este parámetro, la Directiva 2009/28/CE señala que la Comisión adoptará, a más tardar el 31 de diciembre de 2009, un conjunto de normas para la cuantificación de las reservas de carbono en suelo, en base a las “Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero”, Volumen 4 (“Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra”). En este sentido, dichos criterios de cálculo servirán para la estimación de las reservas de carbono en suelo a efectos de dicha directiva.

De lo comentado anteriormente, se deduce que en el presente estudio no se ha tenido en cuenta este factor (emisiones anualizadas procedentes de las modificaciones en las reservas de carbono causadas por el cambio en el uso del suelo).

- **e_p: emisiones procedentes de la transformación**, que son las derivadas de la transformación propiamente dicha de la biomasa de cardo en pelets, los residuos y pérdidas, y la producción de sustancias químicas o productos utilizados en el proceso de transformación.
- **e_{td}: emisiones procedentes del transporte y distribución**, que recogen las emisiones procedentes del transporte y almacenamiento de materias primas y

⁸ Si se divide el peso molecular del CO₂ (44,010 g/mol) por el peso atómico del carbono (12,011 g/mol) se obtiene un cociente de 3,664 (Directiva 2009/28/CE, 2009).

⁹ Por “tierras gravemente degradadas” se consideran tierras que, durante un periodo de tiempo considerable, se han salinizado de manera importante, o bien presentan un contenido de materia orgánica significativamente bajo y han sido gravemente erosionadas. Por “tierras altamente contaminadas” se consideran tierras que no son aptas para el cultivo de productos alimenticios ni de piensos debido a la contaminación del suelo (Directiva 2009/28/CE, 2009).

semiacabadas (biomasa de cardo), y del almacenamiento y la distribución de materias acabadas (pelets de cardo).

- **e_u: emisiones procedentes del combustible cuando se utiliza**, que según la metodología propuesta en la Directiva 2009/28/CE, para el caso de biocarburantes y biolíquidos se consideran nulas, por lo que también se han considerado nulas para el caso de biocombustibles sólidos.

Las emisiones del biocombustible sólido analizado en el estudio, pelets de cardo, son nulas, puesto que la biomasa lignocelulósica presenta un balance neutro de CO₂, ya que cierra el ciclo de carbono que inicia la planta en su crecimiento.

- **e_{sca}: reducción de las emisiones procedente de la acumulación de carbono en suelo mediante una mejora de la gestión agrícola**, es decir, la disminución de emisiones como consecuencia de la aplicación de prácticas de cultivo que suponen la absorción de cantidades significativas de carbono en el suelo, como por ejemplo, la reducción o supresión de laboreo (agricultura de conservación), el establecimiento de cubierta vegetal herbácea en cultivos arbóreos, o sistemas de cultivo bajo producción integrada o ecológica.
- **e_{ccs}: reducción de emisiones procedente de la captura y almacenamiento geológico del carbono**, igual a las emisiones evitadas gracias a la captura y retención del CO₂ emitido, relacionado directamente con la extracción, el transporte, la transformación y la distribución del combustible.

En el sistema analizado no se produce ni captura ni almacenamiento geológico de carbono por lo que este factor tiene un valor nulo en el presente estudio.

- **e_{ccr}: reducción de emisiones procedente de la captura y sustitución del carbono**, igual a las emisiones evitadas gracias a la captura del CO₂ cuyo carbono proviene de la biomasa y se utiliza para sustituir al CO₂ derivado de los combustibles fósiles utilizados en productos y servicios comerciales.

Al no producirse ni captura ni sustitución de carbono, este parámetro tiene un valor nulo en el estudio realizado.

- **e_{ee}: reducción de emisiones procedentes de la electricidad excedentaria de la cogeneración**, que es la que se considera en relación con la electricidad excedentaria generada por los sistemas de producción de combustible que utilizan la cogeneración, excepto cuando el combustible utilizado para la cogeneración sea un coproducto distinto de un residuo de cultivos agrícolas.

Para contabilizar esta electricidad excedentaria, se considera que el tamaño de la unidad de cogeneración es el mínimo necesario para que la unidad de cogeneración puede suministrar el calor requerido para la producción del combustible. Se tiene en cuenta que la reducción de emisiones de GEI asociada a esta electricidad excedentaria es igual a la cantidad de GEI que se emitiría al generar una cantidad igual de electricidad en una central eléctrica alimentada con el mismo combustible que la unidad de cogeneración.

Análogamente a los dos factores anteriores, en el estudio realizado el ahorro de emisiones procedentes de la electricidad excedentaria de la cogeneración es nulo, puesto que en el sistema analizado no se genera electricidad excedentaria que proceda de sistemas de producción de combustible que empleen cogeneración.

De lo comentado anteriormente, teniendo en cuenta los parámetros que se han considerado nulos en el análisis, la fórmula general para el cálculo de las emisiones de GEI procedentes de la producción y el uso de pelets de cardo con fines térmicos se reduce a la siguiente expresión:

$$E = e_{ec} + e_p + e_{td} - e_{sca}$$

Como se establece en la directiva, los GEI que se tienen en cuenta en el análisis son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O). Con el fin de calcular la equivalencia en CO₂, se emplean los factores incluidos en la tabla siguiente.

Tabla 2 Potencial de calentamiento global del CO₂, CH₄ y N₂O (100 años).

GEI	Potencial de calentamiento global
Dióxido de carbono (CO ₂)	1
Metano (CH ₄)	23
Óxido nitroso (N ₂ O)	296

Fuente: Elaboración propia a partir de la Directiva 2009/28/CE (2009).

En esta metodología no se tienen en cuenta las emisiones procedentes de la fabricación de maquinaria y de los equipos implicados en los diferentes procesos productivos del combustible, biocombustible y/o biolíquido, por lo que no se incluye en la fórmula de cálculo.

Por otro lado, la reducción de emisiones de GEI procedentes de los biocarburantes y otros biolíquidos se cuantifican atendiendo a la siguiente fórmula:

$$\text{Reducción} = (E_F - E_B) / E_F$$

siendo,

- E_B, las emisiones totales procedentes del biocombustible u otro biolíquido; y
- E_F, las emisiones totales procedentes del combustible fósil de referencia.

Finalmente, y como ya se ha comentado anteriormente, cabe recordar que la directiva mencionada no hace referencia a los biocombustibles extraídos de biomasa lignocelulósica, caso del estudio que nos ocupa, pelets de cardo. No obstante, la estimación de las emisiones de GEI procedentes de la producción y el uso de pelets de cardo, así como la cuantificación de la reducción de éstas, se ha llevado a cabo asumiendo las pautas generales de dicha directiva.

3.2.1. Emisiones procedentes del cultivo (e_{ec})

En el estudio se considerarán las **emisiones procedentes del proceso de cultivo** de cardo, en concreto, las derivadas de la **combustión del gasóleo utilizado para llevar a cabo las labores agrícolas mecanizadas y los desplazamientos agrícolas**, así como las vinculadas a los **procesos de producción, envasado y transporte de los insumos** (fertilizantes y herbicidas) empleados en el cultivo del cardo.

3.2.1.1. Emisiones derivadas de la combustión del gasóleo de las labores agrícolas mecanizadas y de los desplazamientos de la maquinaria agrícola

La estimación de las emisiones de GEI relativas a la combustión del gasóleo de las labores agrícolas mecanizadas y de los desplazamientos de la maquinaria agrícola, se ha llevado a cabo siguiendo las líneas metodológicas descritas en el documento “Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero” (IPCC, 2006). En concreto, las emisiones se han calculado atendiendo a las fórmulas siguientes:

$$\text{Emisiones CO}_2 \text{ (kg)} = \text{Combustible Consumido (TJ)} \times \text{Factor Emisión CO}_2 \text{ (kg/TJ)}$$

$$\text{Emisiones CH}_4 \text{ (kg)} = \text{Combustible Consumido (TJ)} \times \text{Factor Emisión CH}_4 \text{ (kg/TJ)}$$

$$\text{Emisiones NO}_2 \text{ (kg)} = \text{Combustible Consumido (TJ)} \times \text{Factor Emisión NO}_2 \text{ (kg/TJ)}$$

siendo,

- **Combustible Consumido (TJ)**¹⁰. Por un lado, se han considerado los gastos energéticos derivados de las labores agrícolas mecanizadas, tanto de la campaña de instauración del cultivo del cardo, como de las campañas posteriores a la de implantación del cultivo que completarían el ciclo. Por otro lado, se han tenido en cuenta los requerimientos energéticos necesarios para los desplazamientos de la maquinaria agrícola desde el almacén a la parcela de cultivo. En ambos casos, los datos se han extraído del estudio “Balance energético de la producción de pelets a partir de *Cynara cardunculus*” (CAP, 2009).

Respecto al cálculo de los consumos energéticos de las labores agrícolas mecanizadas, se ha partido del establecimiento de un itinerario teórico de cultivo a realizar en las diferentes campañas y etapas de cultivo. Posteriormente se ha estimado la energía invertida en cada labor agrícola mecanizada, en base al consumo de carburante que requiere.

La Tabla 3 muestra la energía primaria necesaria en la campaña de implantación del cultivo del cardo, y la Tabla 4, la energía primaria necesaria en las campañas posteriores a la de instauración del cultivo¹¹.

¹⁰ 1 terajulio equivale a 10¹² julios.

¹¹ Como se recoge en el estudio “Balance energético de la producción de pelets a partir de *Cynara cardunculus* “ (CAP, 2009), 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. Asimismo, se ha tenido en cuenta los rendimientos en biomasa recogidos en la Tabla 1 y el factor de semilla de 1,009.

Tabla 3 Energía primaria requerida en la campaña de implantación del cultivo del cardo.

Campaña de instauración del cultivo			
Etapa	Labor	Componente	MJ/t biomasa
Presiembra	Preparación del terreno	Subsolador	182,18
		Vibrocultivador	47,53
	Abonado de fondo	Abonadora centrífuga (aplicación de 600 kg/ha de abono complejo N-P-K, 8:15:15)	11,88
Siembra	Siembra	Sembradora de precisión (siembra: 5 kg/ha de semilla; densidad de plantación: 15.000 plantas/ha)	51,49
		Rulo	39,60
	Tratamiento herbicida	Pulverizador hidráulico (aplicación de 3l/ha de trifluralina (30%) y linurón (10%))	8,71
Crecimiento	Mantenimiento del cultivo (aclareo)	Cultivador de brazos	47,53
Recolección	Recolección	Cosechadora picadora (*)	213,87
		Remolque autocargador	11,88
TOTAL			614,67

(*) Para la recolección del cardo puede emplearse una cosecha picadora de maíz adaptada.

Fuente: Elaboración propia a partir de CAP (2009).

Tabla 4 Energía primaria requerida en las campañas posteriores a la instauración del cultivo del cardo.

Campañas posteriores			
Etapa	Labor	Componente	MJ/t biomasa
Crecimiento	Mantenimiento del cultivo (aclareo)	Cultivador de brazos	23,76
Recolección	Recolección	Cosechadora picadora (*)	142,58
		Remolque autocargador	9,90
TOTAL (por campaña o año)			176,24

(*) Para la recolección del cardo puede emplearse una cosecha picadora de maíz adaptada.

Fuente: Elaboración propia a partir de CAP (2009).

Para el cálculo de los consumos energéticos de los desplazamientos de la maquinaria agrícola desde el almacén a la parcela de cultivo se ha considerado una distancia media desde el almacén donde se localiza la maquinaria hasta la parcela de cultivo de 1 kilómetro, y se ha tenido en cuenta los consumos de gasóleo de los trabajos de desplazamiento y transporte establecidos por el IDAE que diferencia entre consumo “medio”, “máximo” y “mínimo” en función de las condiciones de trabajo para el desplazamiento de la maquinaria con carga y sin ella (IDAE, 2005a). Asimismo, se

considera que el consumo de carburante es variable para determinadas máquinas (sembradoras y maquinaria de distribución de fertilizantes y fitosanitarios):

- 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. En esta situación se ha considerado un consumo de gasóleo “máximo”.
 - 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.

En la Tabla 5 se incluyen los gastos energéticos derivados de los desplazamientos de la maquinaria agrícola desde el almacén a la parcela de cultivo, tanto en la campaña de instauración como en las siguientes¹².

¹² Como se muestra en el estudio “Balance energético de la producción de pelets a partir de *Cynara cardunculus* “ (CAP, 2009), para el cálculo de la energía primaria requerida para los desplazamientos de la maquinaria agrícola desde el almacén a la parcela de cultivo 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. Asimismo, se ha tenido en cuenta los rendimientos en biomasa recogidos en la Tabla 1 y el factor de semilla de 1,009.

Tabla 5 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 biomasa
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 biomasa
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 biomasa
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-almacén (km)	Consumo de gasóleo (l)	MJ/t biomasa
6,00	0,37	2,00	4,48	35,17
TOTAL (campaña de instauración del cultivo)				56,72
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-almacén (km)	Consumo de gasóleo (l)	MJ/t biomasa
3,00	0,37	2,00	2,22	8,79
TOTAL	Por campaña o año			8,79
	Siete campañas o años			61,53
TOTAL	Ciclo completo de cultivo (ochos campañas o años)			118,25
	Por campaña o año			14,78

Fuente: Elaboración propia a partir de CAP (2009).

- **Factor de Emisión (CO₂, CH₄, NO₂) (kg/TJ)**. Se refiere a los factores de emisión por defecto, así como los valores inferiores y superiores, para las **fuentes y maquinaria móviles todo terreno**¹³, de los GEI considerados en el estudio (CO₂, CH₄, N₂O), y que

¹³ En la categoría “transporte todo terreno” se incluye los vehículos y la maquinaria móvil utilizados en la agricultura, silvicultura, industria (incluidos la construcción y el mantenimiento), el sector residencial y los sectores tales como el equipo de apoyo de tierra de los aeropuertos, los tractores agrícolas, las motosierras, los autoelevadores y las motos de nieve (IPCC, 2006).

se incluyen en “Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero” (IPCC, 2006) (Tabla 6).

Tabla 6 Factores de emisión por defecto (así como los valores inferiores y superiores) para las **fuentes y maquinaria móviles todo terreno** (kg/TJ).

kg/TJ								
CO ₂			CH ₄			N ₂ O		
Por defecto	Inferior	Superior	Por defecto	Inferior	Superior	Por defecto	Inferior	Superior
74.100	72.600	74.800	4,15	1,67	10,40	28,60	14,30	85,80

Fuente: Elaboración propia a partir del IPCC (2006).

Como se observará en el capítulo de resultados, una vez determinadas las emisiones de GEI procedentes de la combustión del gasóleo total requerido para realizar las labores agrícolas mecanizadas y los desplazamientos de la maquinaria agrícola desde el almacén a la parcela de cultivo, expresadas en kilogramos, se transformarán en gCO₂eq/MJ, teniendo en cuenta tanto los valores de potencial de calentamiento global del CO₂, CH₄ y N₂O, incluidos en la Tabla 2, como el contenido energético de una tonelada de pelets de cardo, cuyo valor es 13.787 megajulios.

3.2.1.2. Emisiones derivadas de la producción, envasado y transporte de los insumos (fertilizantes y herbicidas)

Respecto a las emisiones de GEI procedentes de los **procesos de producción, envasado y transporte de los insumos** (fertilizantes y herbicidas) utilizados durante el cultivo del cardo, se han tenido en cuenta los siguientes aspectos:

- Considerando la **aplicación de un abono complejo N-P-K 8:15:15**, las emisiones de GEI derivadas de su producción, envasado y transporte, expresadas en kilogramos de CO₂ equivalente, se han estimado partiendo de las emisiones de las cantidades correspondientes a cada uno de los componentes simples del abono complejo (nitrógeno, fósforo y potasio).

La Tabla 7 muestra las emisiones de GEI, expresadas en kilogramos de C y de CO₂ equivalentes por kilogramo de fertilizante simple, procedentes de la producción, envasado y transporte de los fertilizantes que se han tenido en cuenta en el estudio.

Tabla 7 Emisiones de GEI procedentes de la producción, envasado y transporte de los fertilizantes (nitrógeno, fósforo y potasio) empleados en el cultivo del cardo.

Componente	kg de C equivalente/kg fertilizante	kg de CO ₂ equivalente/kg fertilizante
Nitrógeno fertilizante	0,857	3,14
Fósforo fertilizante	0,120	0,44
Potasio fertilizante	0,165	0,60

Fuente: Elaboración propia a partir de West y Marland (2002).

Los valores propuestos por West y Marland, expresados en kilogramos de C equivalente por kilogramo de fertilizante, hacen referencia a la extracción de nitrógeno fertilizante a partir de amoníaco (NH₃), de fósforo fertilizante a partir de superfosfato

(PO) y de potasio fertilizante a partir de potasa (KO). Para su conversión en kilogramos de CO₂ equivalente, se ha empleado el factor de emisiones de CO₂ equivalente/C equivalente, igual a 3,664.

- Teniendo en cuenta que se aplica al cultivo **un tratamiento con herbicidas** en la fase de siembra, en concreto, **una mezcla de trifluralina y linurón**, las emisiones de GEI derivadas de su producción, envasado y transporte, expresadas en kilogramos de CO₂ equivalente, se han cuantificado a partir de las emisiones de las cantidades correspondientes a cada una de las materias activas de los herbicidas de la mezcla utilizada.

La Tabla 8 muestra las emisiones de GEI, expresadas en kilogramos de C y de CO₂ equivalentes por kilogramo de materia activa, procedentes de los procesos de producción, envasado y transporte de los herbicidas específicos considerados en el estudio.

Tabla 8 Emisiones de GEI procedentes de la producción, envasado y transporte del tratamiento herbicida empleado en el cultivo del cardo.

Componente	kg de C equivalente/kg materia activa	kg de CO ₂ equivalente/kg materia activa
Trifluralina	3,00	10,99
Linurón	5,80	21,25

Fuente: Elaboración propia a partir de Lal (2004).

Como en el caso del tratamiento fertilizante, se ha empleado el mismo factor de conversión de C equivalente a CO₂ equivalente.

Estimadas las emisiones de GEI, procedentes de los procesos de producción, envasado y transporte de los insumos (fertilizantes y herbicidas) empleados en la campaña de instauración del cultivo, expresadas en kilogramos de CO₂ equivalente, se transformarán en emisiones de GEI expresadas en gCO₂eq/MJ. Para ello, al igual que el caso de las emisiones de GEI derivadas de la combustión del gasóleo total requerido para realizar las labores agrícolas mecanizadas y los desplazamientos de la maquinaria agrícola desde el almacén hasta la parcela de cultivo, se ha tenido en cuenta que el contenido energético de una tonelada de pelets de cardo es igual a 13.787 megajulios, y que el rendimiento en la campaña de instauración del cultivo del cardo, año en el que se aplican los insumos, es de 5,41 t biomasa/ha año (Tabla 1).

3.2.2. Emisiones procedentes de la transformación de la biomasa procedente de cardo en pelets (e_p)

Para la estimación de las emisiones de los GEI derivadas de la **transformación de la biomasa de cardo en pelets**, se han considerado las emisiones procedentes de la energía primaria requerida por este proceso productivo, la cual se ha extraído de la publicación "Balance energético de la producción de pelets a partir de *Cynara cardunculus*" (CAP, 2009).

Como se recoge en dicho estudio, se ha considerado que la transformación de la biomasa de cardo en pelets consta de los procesos de limpieza y despedregado, pretriturado, secado, triturado, prensado y almacenamiento. Asimismo, los gastos energéticos realizados durante las distintas fases de proceso se han estimado considerando que la energía primaria total

requerida para la producción de pelets representa el 15% de la energía primaria total contenida en los mismos. Específicamente, 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% (Tabla 9).

Tabla 9 Energía primaria requerida para la producción de pelets de biomasa procedente del cultivo del cardo.

Etapas	MJ/t pelets de cardo	
Limpieza y despedregado	---	2.069
Pretriturado	138	
Secado	1.379	
Triturado	276	
Prensado de pelets	276	
Almacenamiento de pelets	---	

Fuente: Elaboración propia a partir de CAP (2009).

La energía primaria requerida en el proceso de transformación, expresada en megajulios por tonelada de pelets, se han transformado en megavatios hora (MWh)¹⁴ por tonelada de pelets. Posteriormente, se ha aplicado el factor de emisión del mix eléctrico español cuyo valor es 450,00 kilogramos de CO₂ equivalente por megavatio hora, incluido en la publicación “La energía en España 2007” de la Secretaría General de Energía del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio” (MITYC, 2008). Por último, éstas emisiones se han transformado en gCO₂eq/MJ de forma análoga a los apartados anteriores.

3.2.3. Emisiones procedentes del transporte y distribución (e_{td})

En este apartado se han considerado las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de la combustión del gasóleo requerido para el traslado de la biomasa de cardo desde la parcela de cultivo hasta la planta peletizadora (transporte de la materia prima) y el traslado de los pelets de cardo desde la planta peletizadora hasta el centro de consumo (distribución del producto acabado).

Referente a las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas del **transporte del cardo desde la parcela de cultivo hasta la planta peletizadora**, se han considerado los aspectos descritos en el estudio “Balance energético de la producción de pelets a partir de *Cynara cardunculus*” (CAP, 2009), y que se resumen a continuación:

- El acopio y traslado de la biomasa picada cosechada se efectúa mediante un conjunto tractor-remolque de un volumen de 33,60 m³ capaz de transportar un peso máximo de 12.000 kilogramos.
- Se ha considerado un radio máximo de recolección de la biomasa procedente del cultivo del cardo económicamente viable de 25 kilómetros (Domínguez y Marcos, 2000).

¹⁴ 1 megajulio equivale a 277,778 megavatio hora (IDAE, 2005b).

- El conjunto tractor-remolque realiza el siguiente recorrido:
 - Viaje de ida: traslado del conjunto tractor-remolque desde la parcela donde se haya instaurado el cultivo hasta la planta peletizadora con carga (25 kilómetros).
 - Viaje de vuelta: traslado del conjunto tractor-remolque desde la planta peletizadora hasta el almacén de la finca sin carga (25 kilómetros).

Teniendo en cuenta la densidad del producto cosechado (100 kg/m^3)¹⁵ y la diferencia de rendimientos existente entre la campaña de instauración del cultivo y las restantes, se lleva a cabo el transporte de la biomasa de cardo en dos ocasiones durante la campaña de implantación del cultivo, y en cuatro ocasiones durante el resto de campañas que completan el ciclo vital del cultivo, sin que en ninguno de los casos se supere el peso máximo que puede transportar el camión¹⁶.

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.

En la Tabla 10 se recoge la energía primaria requerida para llevar a cabo el transporte de la biomasa procedente del cardo desde la parcela de cultivo hasta la planta peletizadora, tanto en la campaña de implantación como en las sucesivas¹⁷.

¹⁵ Valor promedio de los valores de densidad de la paja y los forrajes sueltos recogidos por Ortiz-Cañavate (2003): entre $40\text{-}60 \text{ kg/m}^3$ y 150 kg/m^3 .

¹⁶ Como se recoge en la Tabla 1, el rendimiento considerado en la primera campaña de cultivo del cardo es de $5,41 \text{ t/ha}$, lo que justifica que la producción obtenida sea transportada en dos trayectos, cada uno de ellos con la mitad de la producción obtenida ($2,705 \text{ t}$). Asimismo, a partir del segundo año y en las campañas siguientes, el rendimiento es el doble ($10,82 \text{ t/ha}$) por lo que la biomasa debe ser transportada en cuatro trayectos, cada uno de ellos con la cuarta parte de la producción total obtenida ($2,705 \text{ t}$).

¹⁷ Como se recoge en el estudio “Balance energético de la producción de pelets a partir de *Cynara Cardundulus*” (CAP, 2009), para el cálculo de la energía primaria requerida para el transporte de la biomasa procedente del cardo desde la parcela hasta la planta peletizadora se han utilizado los valores unitarios de consumo de gasóleo para el transporte definidos por el IDAE (2005) y un factor de conversión de $42,47 \text{ MJ/l}$ de gasóleo. Asimismo, se ha tenido en cuenta los rendimientos en biomasa recogidos en la Tabla 1 y el factor de semilla de $1,009$.

Tabla 10 Energía primaria requerida para el transporte de la biomasa procedente del cardo desde la parcela hasta la planta peletizadora (ciclo completo del cultivo).

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 biomasa
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						
Número de viajes	Etapas de transporte	Consumo de gasóleo (l/km)	Distancia (km)	Consumo de gasóleo (l)		MJ/t biomasa
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	Por campaña o año					344,56
	Siete campañas o años					2.411,92
TOTAL	Ciclo completo de cultivo (ochos campañas o años)					2.756,48
	Por campaña o año					344,56

Fuente: Elaboración propia a partir de CAP (2009).

La estimación de las emisiones de gases de efecto derivadas del transporte de la biomasa procedente del cardo desde la parcela hasta la planta peletizadora se ha llevado a cabo del mismo modo que en el caso de las labores agrícolas mecanizadas y los desplazamientos de la maquinaria agrícola desde el almacén hasta la parcela: se han empleado las fórmulas para el cálculo de las emisiones de cada uno de los GEI considerados en el estudio que nos ocupa (CO_2 , CH_4 y N_2O) y los factores de emisión por defecto para las fuentes y maquinaria móviles todo terreno, categoría en la que se incluye la maquinaria agrícola (Tabla 6). Posteriormente, los resultados obtenidos se han traducido en $\text{gCO}_2\text{eq/MJ}$, teniendo en cuenta las consideraciones establecidas en apartados anteriores.

Respecto a la **distribución de los pelets de cardo desde la planta peletizadora hasta el centro de consumo**, se han considerado los siguientes aspectos:

- Un camión de 18 toneladas, sin carga, se traslada desde el centro de consumo hasta la planta peletizadora (viaje de ida), y regresa, con carga, desde la planta peletizadora hasta el centro de consumo (viaje de vuelta).
- Considerando criterios de viabilidad medioambiental y económica, se ha tenido en cuenta que el producto acabado (pelets de cardo) se distribuye a un punto de consumo relativamente próximo del centro de producción (planta peletizadora). Por lo tanto, se ha establecido una distancia media entre la planta peletizadora y el centro de consumo de 50 kilómetros (Fehrenbach *et al.*, 2007).

- Se han tenido en cuenta los valores de emisiones totales de GEI, expresadas en kilogramos de CO₂ equivalente por tonelada-kilómetro, para el transporte de mercancías por carretera proporcionados por el “National Noon-Food Crops Centre”¹⁸. En concreto, para la clase de camión que se ha utilizado en la distribución del producto acabado (pelets de cardo): 0,103 kilogramos de CO₂ equivalente por tonelada-kilómetro. Cabe señalar, que este valor hace referencia a las emisiones de GEI que se generan como consecuencia del viaje del camión de 18 toneladas vacío desde el centro de consumo hasta la planta peletizadora (viaje de ida) y del viaje del camión de 18 toneladas con una carga equivalente a 1 tonelada desde la planta peletizadora hasta el centro de consumo (viaje de vuelta).

3.2.4. Reducción de emisiones procedente de la acumulación de carbono en suelo mediante una mejora de la gestión agrícola (e_{sca})

La instauración del cultivo del cardo presenta diversas ventajas medioambientales entre las que cabe destacar las escasas labores agrícolas que requiere, el ahorro de recursos hídricos ya que necesita poco riego y el exiguo aporte de insumos necesario a las tierras de cultivo.

En este sentido, si bien el cardo es un cultivo plurianual, se ha considerado que su implantación y posterior desarrollo sigue las pautas generales del laboreo de conservación de especies anuales, como cereales, leguminosas y oleaginosas, de la denominada agricultura de conservación. Ésta integra diversas prácticas que permiten el manejo del suelo para usos agrícolas alterando lo menos posible su composición, estructura y biodiversidad natural, protegiéndolo de la erosión (AEAC.SV, 2009)¹⁹.

Entre las diferentes alternativas que se incluyen en el laboreo de conservación, se encuentra el mínimo laboreo, que se define como la “práctica agronómica de agricultura de conservación en cultivos anuales, en las que las únicas labores de alteración del perfil del suelo que se realizan son de tipo vertical y, al menos, el 30% de su superficie se encuentra protegida por restos vegetales” (González Sánchez *et al.*, 2008).

En el estudio realizado se ha tenido en cuenta que a partir del segundo año, el cultivo del cardo se desarrolla en los términos definidos por la técnica del mínimo laboreo, presentado por ello, una mejora en la gestión agrícola del suelo, y por tanto, una acumulación de carbono.

En el capítulo “Estudio bibliográfico sobre la captación de carbono atmosférico mediante el empleo de técnicas de agricultura de conservación y reducción de las emisiones de CO₂” del documento “Métodos de producción agraria compatibles con el medio ambiente: lucha contra la erosión y agricultura de conservación. Informe final” de la Universidad de Córdoba y la Asociación Española Agricultura de Conservación-Suelos Vivos de 2008 se muestran los resultados de los análisis realizados en relación a la fijación de carbono atmosférico para el mínimo laboreo en agricultura de conservación en diferentes comunidades autónomas. En

¹⁸ 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.

¹⁹ Información extraída de la “Ficha técnica Nº 1. Laboreo de conservación en cultivos herbáceos” publicada en la página web de la “Asociación Española Agricultura de Conservación. Suelos Vivos” (AEAC.SV) (<http://www.aeac-sv.org/pdfs/ficha1.pdf>).

Andalucía, en el estudio de dos parcelas de cultivo en la provincia de Sevilla en la que en una se estableció una rotación de trigo y girasol, y en la otra una de trigo, girasol y leguminosa, los coeficientes de fijación de carbono atmosférico obtenidos variaron entre 1,00 y 2,84 toneladas de CO₂ por hectárea y año²⁰.

Para el análisis realizado, se ha utilizado un valor medio de 1,92 toneladas de CO₂ por hectárea y año, que se ha transformado en gCO₂eq/MJ, para lo cual, se han tenido en cuenta las consideraciones establecidas en los apartados precedentes²¹.

4. Resultados del estudio

4.1. Emisiones procedentes del cultivo de las materias primas (e_{ec})

Como se ha descrito en la metodología, las emisiones de GEI procedentes del proceso de cultivo del cardo son las derivadas de la combustión del gasóleo necesario para llevar a cabo las labores agrícolas mecanizadas y los desplazamientos agrícolas, así como las relacionadas con la producción, envasado y transporte de los insumos utilizados en la fase de cultivo del cardo (fertilizantes y herbicidas).

4.1.1. Emisiones derivadas de la combustión del gasóleo de la labores agrícolas mecanizadas y de los desplazamientos de la maquinaria agrícola

4.1.1.1. Emisiones derivadas de la combustión del gasóleo de las labores agrícolas mecanizadas

La Tabla 11 y la Tabla 12 muestran las emisiones de GEI procedentes de la combustión del gasóleo requerido para llevar a cabo las labores agrícolas necesarias para la instauración, crecimiento y desarrollo del cultivo del cardo, del que se extrae biomasa lignocelulósica para la elaboración de pelets.

²⁰ En concreto, la información reseñada se ha extraído del tercer capítulo “Estudio bibliográfico sobre la captación de carbono atmosférico mediante el empleo de técnicas de Agricultura de Conservación y reducción de las emisiones de CO₂”.

²¹ Para realizar el cálculo de la reducción de las emisiones procedente de la acumulación de carbono en suelo mediante una mejora de la gestión agrícola se ha tenido en cuenta el rendimiento obtenido a partir del segundo año del cultivo del cardo (10,82 t biomasa/ha), ya que se ha considerado que es a partir de ese momento cuando se produce la reducción de las emisiones procedente de la acumulación de carbono en suelo como consecuencia de una mejora de la gestión agrícola (menor número de labores agrícolas, ahorro de recursos hídricos, menor número de tratamientos con insumos).

Tabla 11 Emisiones de GEI procedentes de la combustión del gasóleo utilizado para realizar las labores agrícolas mecanizadas durante la campaña de implantación del cardo.

Campaña de instauración del cultivo						
Etapa	Labor	Componente	Emisiones			
			kilogramos			g CO ₂ eq/MJ
			CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
Presiembra	Preparación del terreno	Subsolador	73,033	0,004	0,028	1,092
		Vibrocultivador	19,052	0,001	0,007	0,285
	Abonado de fondo	Abonadora centrífuga	4,763	0,000	0,002	0,071
Siembra	Siembra	Sembradora de precisión	20,640	0,001	0,008	0,309
		Rulo	15,877	0,001	0,006	0,237
	Tratamiento herbicida	Pulverizador hidráulico	3,493	0,000	0,001	0,052
Crecimiento	Mantenimiento del cultivo (aclareo)	Cultivador de brazos	19,052	0,001	0,007	0,285
Recolección	Recolección	Cosechadora picadora	85,734	0,005	0,033	1,282
		Remolque autocargador	4,763	0,000	0,002	0,071
TOTAL			246,407	0,013	0,094	3,684

El cálculo de las emisiones de GEI (CO₂, CH₄ y N₂O) se ha realizado multiplicando el gasto energético de cada una de las labores agrícolas mecanizadas de la campaña de implantación por los factores de emisión de cada uno de los GEI considerados en el estudio para el caso de transporte todo terreno, categoría en la que se incluye la maquinaria agrícola (Tabla 6). Para la estimación de la equivalencia en CO₂ de los diferentes GEI se han utilizado los factores de potencial de calentamiento global recogidos en la Tabla 2. Por último, para transformar los resultados obtenidos en gCO₂eq/MJ se ha tenido en cuenta que el contenido energético de una tonelada de pelets de cardo es igual a 13.787 megajulios.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12 Emisiones de GEI procedentes de la combustión del gasóleo requerido para llevar a cabo el itinerario de cultivo durante las campañas posteriores a la instauración del cultivo.

Campañas posteriores						
Etapa	Labor	Componente	Emisiones			
			kilogramos			gCO ₂ eq/MJ
			CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
Crecimiento	Mantenimiento del cultivo (aclareo)	Cultivador de brazos	19,052	0,001	0,007	0,142
Recolección	Recolección	Cosechadora picadora	114,313	0,006	0,044	0,855
		Remolque autocargador	7,938	0,000	0,003	0,059
TOTAL (por campaña o año)			141,303	0,007	0,054	1,056

El cálculo de las emisiones de GEI (CO₂, CH₄ y N₂O) se ha realizado multiplicando el gasto energético de cada una de las labores agrícolas mecanizadas que se han considerado en las campañas sucesivas a la de implantación por los factores de emisión de cada uno de los GEI considerados en el estudio que nos ocupa para el caso de transporte todo terreno, categoría en la que se incluye la maquinaria agrícola (Tabla 6). Para la estimación de la equivalencia en CO₂ de los diferentes GEI se han empleado los factores de potencial de calentamiento global recogidos en la Tabla 2. Por último, para transformar los resultados obtenidos en gCO₂eq/MJ se ha tenido en cuenta que el contenido energético de una tonelada de pelets de cardo es igual a 13.787 megajulios.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 13 se resumen las emisiones de GEI que proceden de la combustión del gasóleo requerido para llevar a cabo las labores agrícolas necesarias para la instauración, crecimiento y desarrollo del cultivo del cardo.

Tabla 13 Emisiones de GEI derivadas de la combustión del gasóleo total empleado en las labores mecanizadas de cultivo del cardo durante su ciclo vital (gCO₂eq/MJ).

gCO ₂ eq/MJ		
Año 1: Campaña de instauración del cultivo		3,684
Año 2-8: Campañas posteriores		Por campaña
		Total (siete campañas o años)
		1,056
		7,392
TOTAL	Ciclo completo de cultivo (ocho campañas o años)	11,076
	Por campaña o año	1,385

Las emisiones de GEI procedentes de la combustión del gasóleo total empleado en las labores mecanizadas de cultivo de cardo durante su ciclo vital (ocho años) se han calculado sumando las emisiones de GEI derivadas de la combustión del gasóleo total empleado en las labores agrícolas de la campaña de instauración del cultivo y el total de las siete campañas siguientes. Asimismo, las emisiones de GEI procedentes de la combustión del gasóleo total empleado en las labores agrícolas por año se ha calculado dividiendo las emisiones de GEI derivadas de la combustión del gasóleo total empleado en las labores agrícolas del ciclo completo de cultivo entre ocho, número de años considerado como vida media del cardo.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.1.2. Emisiones derivadas de la combustión del gasóleo de los desplazamientos de la maquinaria agrícola

La Tabla 14 muestra los resultados de la estimación de las emisiones de GEI procedentes de la combustión del gasóleo requerido para desplazar la maquinaria agrícola desde el almacén a la parcela de cultivo, tanto en la campaña de instauración como en las siguientes.

Tabla 14 Emisiones de GEI procedentes de la combustión del gasóleo total empleado en 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	Emisiones			
	kilogramos			gCO ₂ eq/MJ
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
Cargada	2,987	0,000	0,001	0,045
Sin carga				
Abonadora	Emisiones			
	kilogramos			gCO ₂ eq/MJ
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
Cargada	2,826	0,000	0,001	0,042
Sin carga				
Maquinaria para el tratamiento herbicida	Emisiones			
	kilogramos			gCO ₂ eq/MJ
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
Cargada	2,826	0,000	0,001	0,042
Sin carga				
Desplazamientos del resto de maquinaria agrícola				
Número de labores agrícolas realizadas	Emisiones			
	kilogramos			gCO ₂ eq/MJ
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
6	14,099	0,001	0,005	0,211
TOTAL	22,738	0,001	00,008	0,340

Años 2-8: campañas posteriores a la implantación del cultivo					
Desplazamientos de maquinaria agrícola (por campaña)					
Número de labores agrícolas realizadas		Emisiones			
		kilogramos			gCO ₂ eq/MJ
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
3		7,049	0,000	0,003	0,053
TOTAL	Por campaña o año	7,049	0,000	0,003	0,053
	Siete campañas o años	49,343	0,000	0,021	0,371

El cálculo de las emisiones de GEI (CO₂, CH₄ y N₂O) se ha realizado multiplicando el gasto energético de los desplazamientos de la maquinaria agrícola desde el almacén a la parcela de cultivo realizados en el conjunto de campañas de cultivo del cardo por los factores de emisión de cada uno de los GEI que se han considerado en el estudio para el caso de transporte todo terreno, categoría en la que se incluye la maquinaria agrícola (Tabla 6). Para la estimación de la equivalencia en CO₂ de los diferentes GEI se han utilizado los factores de potencial de calentamiento global recogidos en la Tabla 2. Por último, para transformar los resultados obtenidos en gCO₂eq/MJ se ha tenido en cuenta que el contenido energético de una tonelada de biomasa de cardo es igual a 13.787 megajulios.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 15 se resumen los resultados del cálculo de las emisiones de GEI procedentes de la combustión del gasóleo empleado en los desplazamientos de la maquinaria agrícola desde el almacén a la parcela de cultivo en el ciclo completo de ocho años

Tabla 15 Emisiones totales de GEI derivadas de la combustión del gasóleo total empleado en los desplazamientos de la maquinaria agrícola desde el almacén a la parcela (gCO₂eq/MJ).

gCO ₂ eq/MJ		
Año 1: Campaña de instauración del cultivo		0,340
Año 2-8: Campañas posteriores		Por campaña
		Total (siete campañas o años)
		0,053
		0,371
TOTAL	Ciclo completo de cultivo (ochos campañas o años)	0,711
	Por campaña o año	0,089

Las emisiones de GEI derivadas de la combustión del gasóleo total empleado en los desplazamientos de la maquinaria agrícola desde el almacén a la parcela de cultivo durante el ciclo vital del cardo se ha calculado sumando las emisiones de GEI derivadas de la combustión del gasóleo total empleado en los desplazamientos de la maquinaria agrícola de la campaña de instauración del cultivo y el total de las siete campañas siguientes. Asimismo, las emisiones de GEI derivadas de la combustión del gasóleo total empleado en los desplazamientos de la maquinaria agrícola desde el almacén a la parcela de cultivo por año se ha calculado dividiendo las emisiones de GEI derivadas de la combustión del gasóleo total empleado en los desplazamientos de la maquinaria agrícola desde el almacén a la parcela de cultivo del ciclo completo de cultivo entre ocho, número de años considerado como vida media del cardo.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.1.3. Resumen de las emisiones derivadas de la combustión del gasóleo de las labores agrícolas mecanizadas y de los desplazamientos de la maquinaria agrícola

En la Tabla 16 se sintetizan las emisiones de GEI que se derivan de la combustión del gasóleo requerido para llevar a cabo las labores agrícolas mecanizadas y los desplazamientos de la maquinaria agrícola desde el almacén hasta la parcela de cultivo.

Tabla 16 Emisiones de GEI derivadas de la combustión del gasóleo total empleado en las labores mecanizadas y de los desplazamientos de la maquinaria agrícola (gCO₂eq/MJ).

gCO ₂ eq/MJ			
	Años / Campañas		
	Año 1: Campaña de instauración del cultivo	Año 2-8: Campañas posteriores	
		Por campaña	Total (siete campañas o años)
Labores agrícolas mecanizadas	3,684	1,056	7,392
Desplazamientos de la maquinaria agrícola	0,340	0,053	0,371
TOTAL	4,024	1,109	7,763
<hr/>			
TOTAL	Ciclo completo de cultivo (ocho campañas o años)		11,787
	Por campaña o año		1,473

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2. Emisiones derivadas de la producción, envasado y transporte de los insumos (fertilizantes y herbicidas)

En el presente apartado se muestran los resultados obtenidos de la estimación de las emisiones de GEI procedentes de la producción, envasado y transporte de los insumos utilizados en el ciclo completo del cultivo del cardo (fertilizantes y herbicidas).

Respecto a la **fertilización**, se ha considerado la aportación de **600 kg/ha de abono complejo N-P-K 8:15:15**, por lo que las emisiones de GEI se han calculado como la suma de las emisiones de GEI procedentes de la producción, envasado y transporte de nitrógeno, fósforo y potasio fertilizantes en las proporciones indicadas (Tabla 17).

Tabla 17 Emisiones de GEI procedentes de la producción, envasado y transporte de los fertilizantes (nitrógeno, fósforo y potasio) utilizados en el cultivo del cardo (gCO₂eq/MJ).

Componente	kg de CO ₂ equivalente/kg fertilizante	Cantidad fertilizantes (kg)	kilogramos de CO ₂ equivalente/t biomasa	gCO ₂ eq/MJ
Nitrógeno fertilizante	3,140	48,000	27,860	2,021
Fósforo fertilizante	0,440	39,600	3,218	0,233
Potasio fertilizante	0,605	74,700	8,348	0,605
TOTAL			39,426	2,859

Los valores propuestos por West y Marland, expresados en kilogramos de C equivalente/kg fertilizante, hacen referencia a la extracción de nitrógeno, fósforo y potasio fertilizante. Asimismo, se ha empleado el factor de emisiones de CO₂ equivalente/C equivalente para convertir las emisiones de C equivalente en emisiones de CO₂ equivalente cuyo valor es 3,664. Para transformar los resultados obtenidos en gCO₂eq/MJ se ha tenido en cuenta que el contenido energético de una tonelada de pelets de cardo es igual a 13.787 megajulios y que el rendimiento del cultivo en la campaña de instauración es de 5,41 t biomasa/ha año.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 18 se recogen las emisiones de GEI, expresadas en kilogramos de CO₂ equivalente, procedentes de la producción, envasado y transporte 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 etapa de siembra del cultivo.

Tabla 18 Emisiones de GEI procedentes de la producción, envasado y transporte del tratamiento herbicida empleado en el cultivo del cardo (gCO₂eq/MJ).

Componente	kg de CO ₂ equivalente/kg materia activa	Cantidad componentes (kg)	kilogramos de CO ₂ equivalente/t biomasa	gCO ₂ eq/MJ
Trifluralina (30%)	10,992	0,900	1,829	0,133
Linurón (10%)	21,251	0,300	1,178	0,085
TOTAL			3,007	0,218

Se ha utilizado el factor emisiones de CO₂ equivalente/C equivalente para convertir las emisiones de C equivalente en emisiones de CO₂ equivalente igual a 3,664. Para transformar los resultados obtenidos en gCO₂eq/MJ se ha tenido en cuenta que el contenido energético de una tonelada de pelets de cardo es igual a 13.787 megajulios y que el rendimiento del cultivo en la campaña de instauración es de 5,41 t biomasa/ha año.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 19 se resumen las emisiones de GEI procedentes de la producción, envasado y transporte de los insumos (fertilizantes y herbicidas) utilizados en la etapa de cultivo del cardo.

Tabla 19 Emisiones de GEI generadas por la producción, envasado y transporte de los insumos (fertilizantes y herbicidas) utilizados en el cultivo del cardo (gCO₂eq/MJ).

gCO ₂ eq/MJ		
Tratamiento fertilizante		2,859
Tratamiento herbicida		0,218
TOTAL	Ciclo completo de cultivo (ocho campañas o años)	3,077
	Por campaña o año	0,385

Fuente: Elaboración propia.

4.1.3. Emisiones procedentes del cultivo de las materias primas: síntesis de resultados

En la Tabla 20 se muestra resumidamente las emisiones de GEI, expresadas en gCO₂eq/MJ, procedentes del cultivo de las materias primas, cardo en el estudio que nos ocupa.

Tabla 20 Emisiones totales de GEI procedentes de la producción de biomasa de cardo.

	gCO ₂ eq/MJ	Contribución respecto a los subapartados (%)	Contribución respecto al total (%)	
Campana de instauración del cultivo	Labores agrícolas	3,684	100,00%	24,78%
	Subsolador	1,092	29,64%	7,35%
	Vibrocultivador	0,285	7,74%	1,92%
	Abonado de fondo (Abonadora centrífuga; abono complejo NPK, 8:15:15, 600 kg/ha)	0,071	1,93%	0,48%
	Siembra (Sembradora de precisión; semilla: 5 kg/ha, 15.000 plantas/ha)	0,309	8,39%	2,08%
	Rulo	0,237	6,43%	1,59%
	Tratamiento herbicida (pulverizado de una mezcla de trifluralina (30%) y linurón (10%))	0,052	1,41%	0,35%
	Cultivador de brazos	0,285	7,74%	1,92%
	Cosechadora picadora de maíz	1,282	34,80%	8,62%
	Remolque autocargador	0,071	1,93%	0,48%
	Producción, envasado y transporte de insumos	3,077	100,00%	20,70%
	Fertilizantes	2,859	100,00%	19,23%
	Nitrógeno	2,021	70,69%	13,60%
	Fósforo	0,233	8,15%	1,57%
	Potasio	0,605	21,16%	4,07%
	Herbicidas	0,218	100,00%	1,47%

		gCO ₂ eq/MJ	Contribución respecto a los subapartados (%)	Contribución respecto al total (%)	
	Trifluralina	0,133	61,01%	0,89%	
	Linurón	0,085	38,99%	0,57%	
	Desplazamientos de maquinaria agrícola e insumos	0,340	100,00%	2,29%	
	TOTAL	7,101	100,00%	47,77%	
Campanías siguientes	Total campañas (siete)	Labores agrícolas	7,392	100,00%	49,73%
		Cultivador de brazos	0,994	13,45%	6,69%
		Cosechadora picadora de maíz	5,985	80,97%	40,27%
		Remolque autocargador	0,413	5,59%	2,78%
		Desplazamientos de maquinaria agrícola	0,371	100,00%	2,50%
		TOTAL	7,763	100,00%	52,23%
TOTAL		14,864	100,00%	100,00%	

Fuente: Elaboración propia.

Si se dividen las emisiones totales de GEI del proceso de extracción de la materia prima por el número de años de su ciclo completo de cultivo, considerado de ocho años, se obtiene un valor igual a **1,858 gCO₂eq/MJ**.

El conjunto de actuaciones llevadas a cabo en la campaña de instauración del cardo (labores agrícolas; producción, envasado y transporte de insumos; y desplazamientos de maquinaria agrícola e insumos) supone el 47,77% de las emisiones de GEI procedentes de la fase de cultivo, mientras que las requeridas en las campañas posteriores que completan el ciclo de cultivo suponen en su totalidad el 52,23%.

El grueso de las emisiones de GEI generadas en la fase de producción de biomasa se deben a las labores agrícolas, alcanzando el 74,51% respecto del total.

En cuanto a las emisiones de GEI generadas por la producción, envasado y transporte de los insumos utilizados en la campaña de instauración del cultivo, cabe indicar que suponen el 20,70% de las emisiones totales de GEI generadas durante el cultivo de cardo. Del conjunto de insumos, los fertilizantes, con un 19,23%, son la principal fuente de emisión de GEI. Sin embargo, la producción, envasado y transporte de los herbicidas empleados en la campaña de implantación del cultivo, apenas suponen el 1,47% del total de las emisiones de GEI generadas en la fase de producción de biomasa.

Por último, las emisiones de GEI originadas por la combustión del gasóleo requerido para los desplazamientos de la maquinaria agrícola desde el almacén de la finca hasta la parcela donde se haya instaurado el cardo suponen un 4,79% de las emisiones totales de GEI de la etapa de cultivo.

4.2. Emisiones procedentes de la transformación (e_p)

4.2.1. Emisiones derivadas del proceso de peletización de la biomasa de cardo

Partiendo de las líneas metodológicas y de las consideraciones previas definidas anteriormente en relación a la etapa de transformación, la Tabla 21 muestra los resultados de la estimación de las emisiones de GEI procedentes del proceso de producción de pelets de cardo.

Tabla 21 Emisiones de GEI resultantes del proceso productivo de pelets de cardo ($\text{gCO}_2\text{eq/MJ}$).

gramos CO_2 equivalente/MJ combustible				
Etapas	MJ/t pelets	MWh/t pelets	kilogramos CO_2 equivalente/t pelets	$\text{gCO}_2\text{eq/MJ}$
Limpieza y despedregado	---	---	---	---
Pretriturado	138	0,038	17,100	1,240
Secado	1.379	0,383	172,350	12,501
Triturado	276	0,077	34,650	2,513
Prensado de pelets	276	0,077	34,650	2,513
Almacenamiento de pelets	---	---	---	---
TOTAL				18,767

Transformada la energía primaria del proceso de producción de pelets de biomasa de cardo de MJ/t pelets a MWh/t pelets, la estimación de las emisiones de GEI se ha realizado considerando un factor de emisión del mix eléctrico español de 450,00 kilogramos de CO_2 por megavatio hora (MITYC, 2008). Para transformar los resultados obtenidos en $\text{gCO}_2\text{eq/MJ}$ se ha tenido en cuenta que el contenido energético de una tonelada de pelets de cardo es igual a 13.787 megajulios.

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Emisiones procedentes del transporte y distribución (e_{td})

La Tabla 22 y Tabla 23 muestran los resultados de la estimación de las emisiones de GEI procedentes del transporte de la biomasa de cardo, desde la parcela de cultivo hasta la planta peletizadora, y de la distribución de los pelets, desde la planta peletizadora hasta el centro de consumo.

Tabla 22 Emisiones de GEI derivadas del transporte de la biomasa procedente del cardo desde la parcela hasta la planta peletizadora (gCO₂eq/MJ).

Año 1: campaña de instauración del cultivo						
Número de viajes	Etapas de transporte	Emisiones				gCO ₂ eq/MJ
		kilogramos				
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O		
2	Parcela – planta peletizadora (con carga)	138,128	0,008	0,053	2,066	
	Planta peletizadora – almacén (sin carga)					
TOTAL					2,066	
Años 2-8: campañas posteriores a la implantación del cultivo						
Número de viajes	Etapas de transporte	Emisiones				gCO ₂ eq/MJ
		Kilogramos				
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O		
4	Parcela – planta peletizadora (con carga)	138,128	0,008	0,053	2,066	
	Planta peletizadora – almacén (sin carga)					
TOTAL	Por campaña o año				2,066	
	Campañas posteriores a la instauración del cultivo (siete campañas o años)				14,462	
TOTAL	Ciclo completo de cultivo (ocho campañas o años)				16,528	
	Por campaña o año				2,066	

El cálculo de las emisiones de GEI (CO₂, CH₄ y N₂O) se ha realizado multiplicando el gasto energético derivado del conjunto de viajes necesarios para el transporte de la biomasa de cardo desde la parcela hasta la planta peletizadora en las ocho campañas de cultivo por los factores de emisión de cada GEI considerado en el estudio para el caso del transporte todo terreno, categoría en la que se incluye la maquinaria agrícola (Tabla 6). Para la estimación de la equivalencia en CO₂ de los diferentes GEI, se han utilizado los factores de potencial de calentamiento global recogidos en la Tabla 2. Por último, para expresar los resultados obtenidos en gCO₂eq/MJ se ha tenido en cuenta que el contenido energético de una tonelada de pelets de cardo es igual a 13.787 megajulios.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23 Emisiones de GEI derivadas de la distribución de los pelets de cardo desde la planta peletizadora hasta el centro de consumo (gCO₂eq/MJ).

gCO ₂ eq/MJ				
Número de viajes	Etapas de transporte	kilogramos de CO ₂ equivalente/t-km	Distancia (km)	gCO ₂ eq/MJ
1	Centro de consumo (sin carga) – Planta peletizadora	0,103	50,00	0,374
1	Planta peletizadora – Centro de consumo (con carga)	0,103	50,00	0,374
TOTAL				0,748

Para la distribución de los pelets de cardo desde la planta peletizadora hasta el centro de consumo, se han considerado que un camión de 18 toneladas, sin carga, se traslada desde el centro de consumo hasta la planta peletizadora (viaje de ida), y regresa, con carga, desde la planta peletizadora hasta el centro de consumo (viaje de vuelta). Asimismo, se ha tenido en cuenta una distancia media entre la planta peletizadora y el centro de consumo de 50 kilómetros, y un valor de emisiones totales de GEI, expresadas en kilogramos de CO₂ equivalente por tonelada y kilómetro recorrido, para el tipo de camión considerado en el estudio, de 0,103 kilogramos, valor que hace referencia a las emisiones de GEI que se generan como consecuencia del traslado del camión de 18 toneladas vacío desde el centro de consumo hasta la planta peletizadora (viaje de ida), y del traslado del camión de 18 toneladas con una carga equivalente a 1 tonelada desde la planta peletizadora hasta el centro de consumo (viaje de vuelta). Para transformar los resultados obtenidos en gCO₂eq/MJ se ha tenido en cuenta que el contenido energético de una tonelada de pelets de biomasa de cardo es igual a 13.787 megajulios.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 24 se resumen las emisiones de GEI que se generan en el proceso de transporte de la materia prima (biomasa de cardo) desde la parcela de cultivo a la planta peletizadora y en el de distribución del producto acabado (pelet de cardo) desde la planta peletizadora hasta el centro de consumo.

Tabla 24 Emisiones de GEI procedentes del transporte y distribución (gCO₂eq/MJ).

gCO ₂ eq/MJ	
Transporte de la materia prima (biomasa de cardo)	2,066
Distribución del producto acabado (pelets de cardo)	0,748
TOTAL	2,814

Fuente: Elaboración propia.

4.4. Reducción de emisiones procedente de la acumulación de carbono en suelo mediante una mejora de la gestión agrícola (e_{sca})

En la Tabla 25 se muestra la reducción de las emisiones procedentes como consecuencia de la acumulación de carbono en el suelo por la mejora de su gestión.

Tabla 25 Reducción de emisiones procedentes de la acumulación de carbono en el suelo por la mejora de la gestión del mismo durante el ciclo completo de cultivo del cardo (gCO₂eq/MJ).

kilogramos CO ₂ equivalente	gCO ₂ eq/MJ
1.920	11,262

Para el análisis que nos ocupa, se ha tenido en cuenta un ahorro de emisiones procedente de la acumulación de carbono en suelo como consecuencia de una mejora de la gestión agrícola de 1,92 t CO₂ equivalente/ha y año. Para transformar los resultados obtenidos en gCO₂eq/MJ se ha tenido en cuenta que el contenido energético de una tonelada de biomasa de cardo es igual a 13.787 megajulios y el rendimiento obtenido a partir del segundo año del cultivo del cardo (10,82 t biomasa/ha), ya que es a partir de ese momento cuando se produce la reducción de las emisiones procedente de la acumulación de carbono en suelo como consecuencia de una mejora de la gestión agrícola. Asimismo, como en los apartados anteriores, el resultado se ha calculado teniendo en cuenta que el ciclo completo del cardo es de ocho años.

Fuente: Elaboración propia.

5. Emisiones totales de GEI procedentes del uso de pelets de cardo

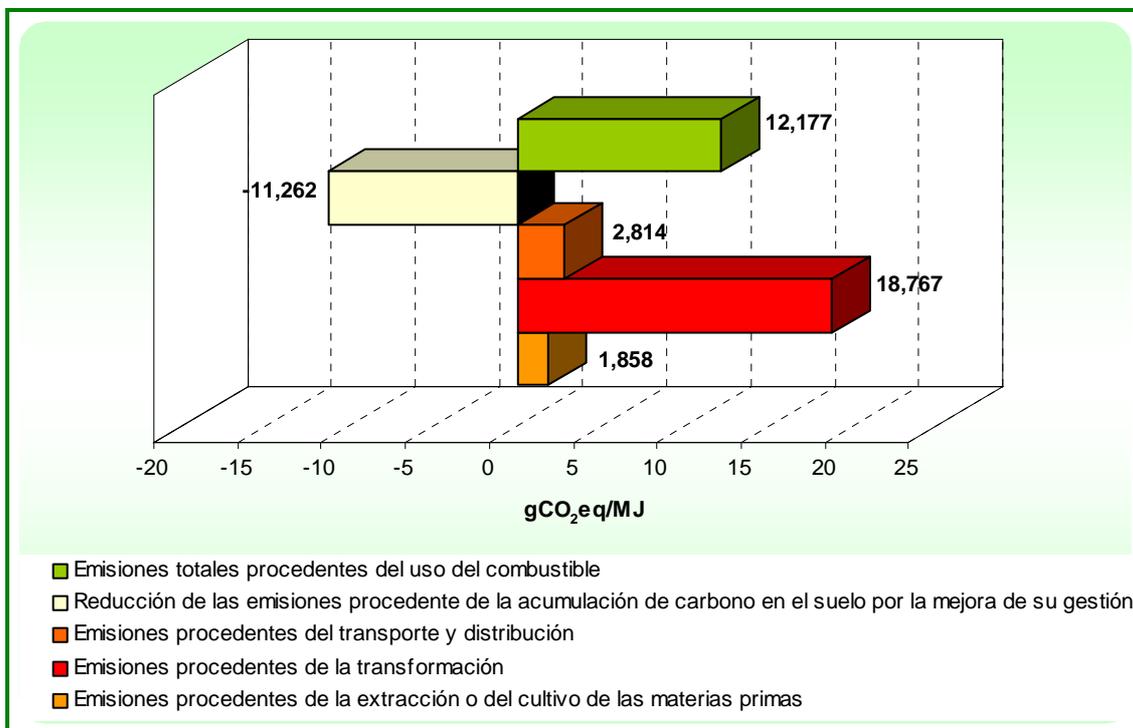
En la Tabla 26 y el Gráfico 1 se sintetizan y se representan, respectivamente, las emisiones de GEI procedentes de la producción y el uso de los pelets de cardo con fines térmicos.

Tabla 26 Emisiones totales de GEI procedentes de la producción y el uso de pelets de cardo con fines térmicos (gCO₂eq/MJ).

Emisiones totales procedentes de la producción y el uso del biocombustible	gCO ₂ eq/MJ
Emisiones procedentes de la extracción o del cultivo de las materias primas (E _{ec})	1,858
Emisiones procedentes de la transformación (E _p)	18,767
Emisiones procedentes del transporte y distribución (E _{td})	2,814
Reducción de emisiones procedente de la acumulación de carbono en suelo mediante una mejora de la gestión agrícola (E _{sca})	-11,262
TOTAL	12,177

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 1 Emisiones totales desagregadas de las emisiones de GEI procedentes de la producción y el uso de los pelets de biomasa de cardo.



Fuente: Elaboración propia.

Los valores obtenidos para el cultivo, y el transporte y distribución para los pelets de cardo se aproximan a los valores por defecto estimados para estos capítulos en el caso de futuros biocarburantes y biolíquidos que no se encontraban o sólo se encontraban en el mercado en cantidades insignificantes en enero de 2008 relacionados en la Directiva 2009/28/CE, y que se han calculado tal como se define en el apartado C del Anexo V de la directiva, es decir, del mismo modo que en el presente estudio (Tabla 27).

Tabla 27 Valores por defecto desagregados para el cultivo, y transporte y distribución de futuros biocarburantes y biolíquidos (gCO₂eq/MJ).

Proceso de producción de los biocarburantes y biolíquidos	gCO ₂ eq/MJ	
	Cultivo	Transporte y distribución
Etanol de paja de trigo	3	2
Etanol de residuos de madera	1	4
Etanol de madera cultivada	6	2
Gasóleo Fischer-Tropsch producido a partir de residuos de madera	1	3
Gasóleo Fischer-Tropsch producido a partir de madera cultivada	4	2
DME ⁽¹⁾ de residuos de madera	1	4
DME de madera cultivada	5	2

Proceso de producción de los biocarburantes y biolíquidos	gCO ₂ eq/MJ	
	Cultivo	Transporte y distribución
Metanol de residuos de madera	1	4
Metanol de madera cultivada	5	2
Parte del MTBE procedente de fuentes renovables	Iguales a los del proceso de metanol utilizado	

(1) Dimetil-éter.

Fuente: Elaboración propia de la Directiva 2009/28/CE (2009).

Las emisiones calculadas para el cultivo del cardo destinado a la producción de pelets (1,858 gCO₂eq/MJ) se aproximan a los valores típicos y por defecto estimados para la extracción de las materias primas destinadas a la producción de biocarburantes y biolíquidos como el etanol de paja de trigo (3 gCO₂eq/MJ), el etanol de residuos de madera (1 gCO₂eq/MJ), el gasóleo Fischer-Tropsch producido a partir de residuos de madera (1 gCO₂eq/MJ), el dimetil-éter de residuos de madera (1 gCO₂eq/MJ) y metanol de residuos de madera (1 gCO₂eq/MJ). Asimismo, los valores calculados para el transporte y distribución del sistema analizado (2,814 gCO₂eq/MJ) se asemejan a los valores típicos y por defecto estimados para el transporte y distribución de biocarburantes y biolíquidos como el etanol de paja de trigo (2 gCO₂eq/MJ), el etanol de madera cultivada (2 gCO₂eq/MJ), el gasóleo Fischer-Tropsch producido a partir de residuos de madera (3 gCO₂eq/MJ), el gasóleo Fischer-Tropsch producido a partir de madera cultivada (2 gCO₂eq/MJ), el dimetil-éter de madera cultivada (2 gCO₂eq/MJ) y el metanol de madera cultivada (2 gCO₂eq/MJ).

Igualmente, el valor obtenido para la transformación se aproxima a los valores por defecto estimados para este capítulo en el caso de biocarburantes y biolíquidos que actualmente se encuentran en el mercado, y que también se incluyen en la Directiva 2009/28/CE. Del mismo modo que en el caso del cultivo y transporte y distribución de futuros biocarburantes y biolíquidos que no se encontraban o sólo se encontraban en el mercado en cantidades insignificantes en enero de 2008, los valores relativos a la transformación se han cuantificado teniendo en cuenta las líneas metodológicas incluidas en el apartado C del Anexo V de la directiva, al igual que en el presente estudio (Tabla 28).

Tabla 28 Valores por defecto desagregados para la transformación de biocarburantes y biolíquidos que actualmente se encuentran en el mercado (gCO₂eq/MJ).

gCO ₂ eq/MJ	
Proceso de producción de los biocarburantes y biolíquidos	Transformación
Etanol de remolacha azucarera	26
Etanol de trigo (combustible de proceso no especificado)	45
Etanol de trigo (lignito como combustible de proceso en instalaciones de cogeneración)	45
Etanol de trigo (gas natural como combustible de proceso en caldera convencional)	30
Etanol de trigo (gas natural como combustible de proceso en instalaciones de cogeneración)	19
Etanol de trigo (paja como combustible de proceso en instalaciones de cogeneración)	1

gCO ₂ eq/MJ	
Proceso de producción de los biocarburantes y biolíquidos	Transformación
Etanol de maíz, producción comunitaria (gas natural como combustible de proceso en instalaciones de cogeneración)	21
Etanol de caña de azúcar	1
Parte de ETBE procedente de fuentes renovables	Igual a los del proceso de etanol utilizado
Parte del TAE procedente de fuentes renovables	Igual a los del proceso de etanol utilizado
Biodiésel de colza	22
Biodiésel de girasol	22
Biodiésel de soja	26
Biodiésel de aceite de palma (proceso no especificado)	49
Biodiésel de aceite de palma (proceso con captura de metano en la almazara)	18
Biodiésel de aceites usados de origen vegetal o animal	13
Aceite vegetal de colza tratado con hidrógeno	13
Aceite vegetal de girasol tratado con hidrógeno	13
Aceite vegetal de palma tratado con hidrógeno (proceso no especificado)	42
Aceite vegetal de palma tratado con hidrógeno (proceso con captura de metano en la almazara)	9
Aceite vegetal puro de colza	5
Biogás producido a partir de residuos orgánicos urbanos como gas natural comprimido	20
Biogás producido a partir de estiércol húmedo como gas natural comprimido	11
Biogás producido a partir de estiércol seco como gas natural comprimido	11

Fuente: Elaboración propia de la Directiva 2009/28/CE (2009).

Como ocurre con las emisiones procedentes del cultivo del cardo para la producción de pelets, y las estimadas para su transporte y distribución, las referentes al proceso de transformación (18,767 gCO₂eq/MJ) se aproximan a los valores por defecto estimados para los procesos de transformación de biocarburantes y biolíquidos como el etanol de trigo (gas natural como combustible de proceso en instalaciones de cogeneración) (19 gCO₂eq/MJ), el etanol de maíz de producción comunitaria (gas natural como combustible de proceso en instalaciones de cogeneración) (21 gCO₂eq/MJ), el biodiésel de colza (22 gCO₂eq/MJ), el biodiésel de girasol (22 gCO₂eq/MJ), el biodiésel de aceite de palma (proceso con captura de metano en la almazara) (18 gCO₂eq/MJ) y el biogás producido a partir de residuos orgánicos urbanos como gas natural comprimido (20 gCO₂eq/MJ).

6. Reducción de emisiones de GEI procedentes del uso de pelets de cardo

Como se explica en el apartado de metodología, la reducción de emisiones de GEI derivados de la combustión de pelets de biomasa procedente del cultivo del cardo, se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Reducción} = (E_F - E_B) / E_F$$

siendo, E_B las emisiones totales procedentes del biocarburante u otro biolíquido, y E_F las emisiones totales procedentes del combustible fósil de referencia. Respecto a los usos térmicos de la biomasa, como es el caso de los pelets de biomasa de cardo objeto del presente estudio, la referencia la constituye el empleo de gasóleo C para calefacción, con un valor igual a 73,440 gCO₂eq/MJ (IDAE, 2005b).

Las **emisiones totales procedentes de los pelets de cardo (E_B)** alcanzan un valor igual a **12,177 gCO₂eq/MJ**, mientras que las **emisiones totales procedentes del combustible fósil de referencia (E_F)** son iguales a **73,440 gCO₂eq/MJ**.

Sustituyendo, el resultado es el siguiente:

$$\text{Reducción} = (73,440 - 12,177) / 73,440 = 61,263 / 73,440$$

$$\text{Reducción} = 83,42\%$$

La reducción de emisiones de GEI procedente de la producción y el uso de pelets de biomasa de cardo alcanza el 83,42%, valor similar a los estimados para los futuros biocarburantes que no se encontraban o sólo se encontraban en cantidades insignificantes en el mercado en enero de 2008 (Tabla 29) recogidos en la Directiva 2009/28/CE.

Tabla 29 Valores típicos (y por defecto) para futuros biocarburantes y biolíquidos.

Proceso de producción de los biocarburantes y biolíquidos	Reducción de emisiones de GEI, valores típicos	Reducción de emisiones de GEI, valores por defecto
Etanol de paja de trigo	87%	85%
Etanol de residuos de madera	80%	74%
Etanol de madera cultivada	76%	70%
Gasóleo Fischer-Tropsch producido a partir de residuos de madera	95%	95%
Gasóleo Fischer-Tropsch producido a partir de madera cultivada	93%	93%

Proceso de producción de los biocarburantes y biolíquidos	Reducción de emisiones de GEI, valores típicos	Reducción de emisiones de GEI, valores por defecto
DME de residuos de madera	95%	95%
DME de madera cultivada	92%	92%
Metanol de residuos de madera	94%	94%
Metanol de madera cultivada	91%	91%
Parte del MTBE procedente de fuentes renovables	Iguales a los del proceso de metanol utilizado	

Fuente: Elaboración propia de la Directiva 2009/28/CE (2009).

La reducción de emisiones de GEI derivada de la producción y el uso de pelets de biomasa de cardo (83,42%) se aproxima a los valores por defecto estimados para biocarburantes de segunda generación como el etanol de paja de trigo (85%), el gasóleo Fischer-Tropsch producido a partir de madera cultivada (93%), el dimetil-éter de madera cultivada (92%) y el metanol de madera cultivada (91%).

7. Conclusiones

- Las **emisiones totales de GEI** procedentes de la producción y el uso de pelets de biomasa de cardo alcanzan la cifra de **12,177 gCO₂eq/MJ**.
- La **principal fuente emisora de GEI del sistema** considerado es la **transformación de la biomasa de cardo en pelets**. En concreto, supone el 80% del total de las emisiones de GEI generadas por las diferentes fuentes de emisión consideradas en el estudio. Tras el proceso de transformación, se sitúa el de transporte y distribución con un 12%, y el de cultivo del cardo con un 8%.
- El **único proceso del sistema analizado que reduce el nivel de emisiones de GEI** es la **acumulación de carbono en el suelo como consecuencia de la mejora de la gestión agrícola del mismo**: el cultivo del cardo supone la realización de un escaso número de labores agrarias mecanizadas, así como reducidos aportes de agua y de insumos.
- La **reducción de emisiones de GEI** derivada de la producción y el uso de pelets de biomasa de cardo supone un **83,42%, valor similar al estimado para biocarburantes de segunda generación**, como por ejemplo, etanol de paja de trigo (85%), gasóleo Fischer-Tropsch producido a partir de madera cultivada (93%), dimetil-éter de madera cultivada (92%) y metanol de madera cultivada (91%).
- Tanto **las emisiones totales de GEI procedentes de la producción y del uso de pelets de cardo** como la **reducción de éstas** ponen de manifiesto la **idoneidad de este biocombustible sólido para su destino con fines térmicos como sustituto de los combustibles sólidos**
- El **balance energético** y el **análisis de las emisiones y la reducción de GEI** procedentes de la producción y el uso de pelets de biomasa de cardo confirman la buena aptitud de este biocombustible sólido para su uso en calderas de

viviendas unifamiliares, calefacciones centralizadas de edificios o en redes de calefacción centralizada (calefacción de distrito).

- Finalmente, y como ya se comentó en el estudio “Balance energético de la producción de pelets a partir de *Cynara cardunculus*” (CAP, 2009), en el caso del cardo, **es necesario profundizar en el conocimiento de sus potenciales aprovechamientos alternativos como es la extracción de aceite de sus semillas para la elaboración de biodiesel.** Asimismo, **es preciso estudiar como superar ciertos obstáculos de carácter técnico que se presentan a la hora de su utilización en caldera:** la biomasa de cardo presenta un elevado contenido en cloro, hecho que provoca la emisión de dioxinas, así como la corrosión de las calderas. Para solventar estas dificultades, se puede considerar la posibilidad de mezclar con otros tipos de biomasa, o bien el empleo de sobrecalentadores de titanio, si bien se trata de un tratamiento excesivamente caro que incrementa notablemente los costes económicos del proceso.

Bibliografía

- AEAC.SV (2009). “**Ficha técnica Nº 1. Laboreo de conservación en cultivos herbáceos**”. Asociación Española Agricultura de Conservación. Suelos Vivos.
- CAP (2009). “**Balance energético de la producción de pelets a partir de Cynara cardunculus**”. Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía.
- Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables** y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE (2009).
- Domínguez, J., Marcos, M. J. (2000). “**GIS applied to evaluate biomass power in Andalucía (Spain)**”. Cybergeog. European Journal of Geography. Nº 142. 14. p. ISSN. 1278-3366.
- Fehrenbach H., Giegrich J., Gärtner S., Reinhardt G., Rettenmaier N. (2007). “**Greenhouse Gas Balances for the German Biofuels Quota Legislation. Methodological Guidance and Default Values**”. IFEU (Institut für Energie) – Federal Environment Agency Germany (www.ifeu.de).
- Fernández, J. (2006a). “**El cardo, un cultivo de secano para producción de biocombustibles**”. Vida Rural. Nº 240, pp 44-47. ISSN. 1133-8938.
- 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.
- 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.
- González Sánchez, E. J., Veroz González O., Gómez Ariza M., García Márquez F. (2008). “**Agricultura de conservación en el siglo XXI**”. Vida Rural. Nº 277, pp 25-28. ISSN. 1133-8938.
- Guzmán J. R. A. (2006). “**Panorámica de la agricultura ante el desafío energético y el cambio climático**”. Jornadas sobre la agricultura productora de energía. Colegio Oficial de Ingenieros Agrónomos de Andalucía.
- IDAE (2007). “**Biomasa: Edificios**”. 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.
- IDAE (2005a). “**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.
- IDAE (2005b). “**Plan de Energías Renovables en España 2005-2010**”. 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).

IPCC (2006). “**Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de GEI**”. Panel Intergubernamental del Cambio Climático.

Lal R. (2004). “**Carbon emission from farm operations**”. Environment International. Nº 30 (2004), pp 981-990. ISSN. 0160-4120

MITYC (2008). “**La energía en España 2007**”. Secretaria General de Energía. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

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. Ediciones Mundi-Prensa, S.A. ISBN. 978-84-8476-117-4.

UCO-AEAC.SV (2008). Capítulo “**Estudio bibliográfico sobre la captación de carbono atmosférico mediante el empleo de técnicas de agricultura de conservación y reducción de las emisiones de CO₂**” en “**Métodos de producción agraria compatibles con el medio ambiente: lucha contra la erosión y agricultura de conservación. Informe final**”. Editado por la Universidad de Córdoba y la Asociación Española Agricultura de Conservación. Suelos Vivos.

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.