

BALANCE DE LA EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN OLIVAR DE SECANO ECOLÓGICO Y CONVENCIONAL

Aguilera Fernández, E¹, Lassaletta, L^{2,3}, Guzmán, GI⁴, Alonso, AM⁴

¹ *Sociedad Española de Agricultura Ecológica (SEAE), Camí del Port, S/N. Edif ECA Pat Int 1º - Km 1 (Ap 397) 46470 Catarroja (Valencia, Spain)*

² *Departamento de Ecología, Universidad Complutense de Madrid, c/ José Antonio Novais 2 28040-Madrid, España*

³ *Ecotoxicología de la Contaminación Atmosférica, CIEMAT (ed. 70), Avda. Complutense 22, 28040-Madrid, España*

⁴ *Centro de Investigación y Formación en Agricultura Ecológica y Desarrollo Rural de Granada (CIFAED). Camino Santa Fe-El Jau, s/n; 18320 Santa Fe (Granada)*

RESUMEN

Existe una carencia de estudios integrales que evalúen el papel de los distintos manejos agrícolas en la contribución al cambio climático de los agroecosistemas en el ámbito mediterráneo. En este trabajo hemos tratado de paliar parcialmente esta carencia estimando las emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI) en el sistema olivarero ecológico y convencional de secano en la comarca de Los Pedroches (Córdoba). Hemos partido de información primaria recopilada mediante entrevistas a agricultores ecológicos y convencionales, que ha servido para alimentar el modelo de análisis energético de explotaciones agrícolas PLANETE, mediante el que hemos realizado el balance de GEI. Este balance incluye las emisiones de óxido nitroso (N₂O) y CO₂ asociadas a la producción y uso de insumos, las emisiones de N₂O procedentes del suelo, y las emisiones de metano (CH₄) producidas por el ganado integrado en el sistema. En nuestro caso hemos incorporado también un módulo de secuestro de carbono. Un análisis de sensibilidad ha permitido detectar los factores más influyentes en el balance final. Los resultados preliminares indican que los sistemas estudiados tienen unos niveles muy bajos de emisiones por unidad de superficie, que bajo manejo ecológico son aún menores gracias al ahorro de insumos fósiles y del secuestro de carbono logrado mediante el empleo de cubiertas vegetales y enmiendas orgánicas.

Palabras clave: cambio climático, olivar, modelado, agricultura ecológica

INTRODUCCIÓN

Según el IPCC (Smith et al., 2007), la agricultura es responsable de un 10-12% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI), un 60% de las de óxido nitroso (N₂O) y un 50% de las de metano (CH₄). A nivel europeo, las emisiones de N₂O y CH₄ procedentes de la agricultura bastarían para contrarrestar todo el carbono secuestrado por la creciente masa forestal del continente (Schulze et al., 2009). Estas estimaciones, no obstante, no tienen en cuenta las emisiones procedentes de la fabricación y distribución de los insumos y productos generados, ni el cambio en el stock de carbono del suelo

provocado por las técnicas de manejo. Así, aunque el flujo neto de carbono (C) en el suelo es pequeño en la actualidad, la cantidad almacenada ha sufrido una gran pérdida histórica, en la que se han liberado a la atmósfera 50 petagramos (Pg) de C (Smith et al., 2008). De hecho, el 89% del potencial de mitigación agrícola del cambio climático estaría en el secuestro de C (Smith et al., 2007). Por ejemplo, en un estudio en el *cinturón del maíz* en EEUU, Robertson et al. (2000) encontraron que mediante el no laboreo se conseguía mitigar la mayor parte de las emisiones, directas e indirectas, a través del secuestro de C en el suelo.

Sin embargo, los estudios integrales como el anteriormente citado son escasos en la bibliografía. La complejidad de los muestreos y análisis necesarios ha hecho que la mayoría de las investigaciones se centren en el estudio de uno sólo de los gases implicados, y normalmente en su emisión en uno sólo de los procesos en los que interviene. Por ejemplo, se ha estudiado por separado la emisión directa de N₂O procedente del suelo (Sánchez-Martín et al., 2010, Vallejo et al., 2005, Meijide et al., 2009, Steenwerth et al., 2010), o durante la fabricación de fertilizantes sintéticos (Wood y Cowie, 2004), pero en pocas ocasiones se han comparado opciones de manejo teniendo en cuenta las emisiones durante el ciclo de vida de todos los productos empleados (algunas excepciones son los trabajos de Flessa et al., 2002 y Robertson et al., 2000), y en ningún caso se ha hecho para agroecosistemas mediterráneos (véase Aguilera Fernández et al., 2010).

La evaluación integral del balance de emisiones se ve facilitada por el uso de modelos que simulen aquellos procesos cuya medición resulta muy costosa o compleja. Mediante el uso de modelos se pierde precisión en los resultados obtenidos, pero se obtiene una visión de conjunto que permite evaluar las técnicas de mitigación a nivel de la explotación completa. Esto permite detectar por ejemplo posibles impactos negativos que una técnica encaminada a la mitigación de un gas podría tener sobre las emisiones en otro compartimento del sistema (del Prado et al., 2010). También facilita la detección de los *puntos calientes* del balance de GEI, es decir, aquellos parámetros cuya optimización puede lograr los mejores efectos mitigadores, y cuya correcta cuantificación es crucial para el cálculo de un balance de emisiones fiel a la realidad. Esta función de los modelos se puede desarrollar mediante la realización de un análisis de sensibilidad, en el que se introducen distintos valores para los factores clave, con el objetivo de comprobar el efecto de esta variación sobre el balance final.

En este trabajo se ha tratado, por tanto, de paliar la ausencia de estudios integrales sobre emisiones de GEI en cultivos mediterráneos estudiando las emisiones generadas en un sistema olivarero de secano en Córdoba, mediante la aplicación de un modelo de balance de emisiones acoplado a un modelo de la dinámica de C en el suelo. Los objetivos específicos son: i) estimar la emisión de GEI en el agroecosistema contrastando los manejos convencional y ecológico; ii) simular la respuesta del sistema ante distintos escenarios propuestos para conocer la potencialidad de las prácticas mitigadoras y detectar los procesos clave en el balance total de GEI.

Los resultados aquí presentados se enmarcan en el proyecto de SEAE "Agricultura Ecológica y Cambio Climático". Debido a que actualmente se está realizando la re-parametrización definitiva de los modelos aplicados,

consideramos los resultados aquí presentados como preliminares. No obstante, el análisis de sensibilidad ofrece una idea de los rangos en que probablemente se moverán los resultados definitivos.

MATERIAL Y MÉTODOS

Este trabajo ha sido realizado en olivares ecológicos y convencionales, todos ellos de secano, de la comarca de los Pedroches (Córdoba). Los suelos en el área de estudio son ácidos y con fuerte pendiente. El clima es Mediterráneo subhúmedo, con una precipitación media anual de 600 mm. La densidad de árboles es de 125-130 olivos/ha, de las variedades Picual y Nevadillo. Se trata de sistemas con aportes muy pequeños de fertilizantes externos. Como media, se aplicaron 0,8 kg N en ecológico, en forma de estiércol ovino y compost comercial, y 1,65 kg N en convencional, en forma de urea, nitrato amónico y triple 15. La productividad es muy baja en relación con otras áreas olivareras, y la integración del ganado (en especial ovejas) es alta. Más información sobre las características agroclimáticas y las técnicas de cultivo puede verse en Guzmán y Alonso (2008) y Alonso (2003).

La información primaria ha sido recopilada mediante entrevistas personales a olivicultores realizadas entre 2001 y 2004. Los agricultores ecológicos fueron seleccionados en función del tiempo que llevasen produciendo en ecológico, para evitar las distorsiones asociadas al descenso en la producción típico del período de transición. Todos ellos llevaban produciendo entre 4 y 10 años en ecológico. En total, se consideraron 25 explotaciones ecológicas, representativas del olivar de secano con fuerte pendiente. Los agricultores convencionales fueron elegidos por su proximidad a los ecológicos, para asegurar condiciones agroclimáticas similares. Se entrevistó a 28 agricultores convencionales. En el Cuadro 1 se describen las principales características del manejo ecológico y convencional.

La información sobre la cosecha de aceituna y el rendimiento de aceite de los 3-4 últimos años se obtuvo de los registros de la cooperativa SCA OLIFE. La biomasa generada por las cubiertas vegetales (espontáneas o sembradas) se midió directamente en el campo a lo largo de varios años (Foraster et al., 2006), tomando la media para nuestros cálculos. La capacidad de carga ganadera se ha estimado a partir de la biomasa seca producida por la cubierta vegetal. Esta carga ganadera potencial obtenida se ha corregido para obtener la carga ganadera real, teniendo en cuenta el % de agricultores que practican la integración ganadera respecto al % de los que usan cubiertas vegetales

Para realizar el balance de emisiones de GEI en la explotación se ha aplicado el modelo francés PLANETE (Bochu, 2002). Este modelo ha sido recientemente aplicado con éxito por investigadores franceses (Veysset et al., 2010) El modelo PLANETE está estructurado como una hoja de cálculo implementada en Microsoft Excel que calcula el balance energético y de emisiones de GEI de un agroecosistema a partir de información sobre el manejo que puede ser suministrada por los agricultores (Bochu, 2002). Para ello emplea factores de emisión para cada insumo o proceso considerado aportados por el propio modelo y basados en información publicada en diversas fuentes. Para su adaptación al olivar mediterráneo ha sido necesario modificar algunos aspectos, e introducir algunos datos ausentes. Insumos como la semilla de veza o las

botellas de plástico utilizadas para luchar contra la mosca del olivo (*Bactrocera oleae*) han tenido que ser incluidos en la aplicación. Los factores de emisión de N_2O considerados para cada tipo de aporte nitrogenado implementados en la aplicación han sido sustituidos por el valor medio propuesto en el informe más reciente del IPCC (2006), del 1% $N-N_2O/N$ aplicado para todos los fertilizantes orgánicos y sintéticos. Algunos parámetros propuestos por el modelo no han sido todavía ajustados a las condiciones agroclimáticas mediterráneas y se han mantenido los propuestos por defecto para Francia.

El cambio en el stock de carbono en el suelo debido al manejo, que se traduce en un secuestro o liberación de CO_2 atmosférico, no es tenido en cuenta en la aplicación PLANETE. En este trabajo sí que se ha incluido, utilizando para ello una adaptación del modelo de Henin-Dupuis (Henin y Dupuis, 1945), que es un modelo exponencial utilizado para simular la dinámica del carbono orgánico del suelo con un solo compartimento para la materia orgánica del suelo. Es, pues, el modelo más simple posible para simular este proceso, a pesar de lo cual, por su versatilidad, se sigue aplicando actualmente (Bechini y Castoldi, 2009, Bayer et al., 2006, Sofo et al., 2005). Está basado en la utilización de dos coeficientes: el coeficiente isohúmico (k_1), que nos indica la cantidad de humus que un aporte orgánico (A) genera en un año, y el coeficiente de mineralización (k_2) que indica el humus que se pierde cada año debido a la respiración del suelo. En nuestro caso, para considerar los aportes de C procedentes de las raíces del olivo, y la presencia de una fracción de materia orgánica (MO) más recalcitrante, hemos incluido otro compartimento para la materia orgánica del suelo, de 10 Mg C ha^{-1} , que se mantendría independientemente de los aportes aquí estudiados. La inclusión en el modelo de esta fracción de carbono orgánico del suelo (COS) se ha realizado restándola al stock inicial de COS estimado.

El stock inicial de COS se ha estimado a partir de los datos proporcionados por Álvarez et al. (2007), que calcula un stock de C de $13,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ en olivares de montaña ecológicos cultivados bajo condiciones de laboreo en el mismo área de estudio. Se ha considerado, en ausencia de datos sobre el stock de COS en olivares convencionales, que ambos sistemas parten de ese mismo valor.

El coeficiente k_2 utilizado ha sido del 1,4%, obtenido a partir de la media de los valores propuestos por Tamés (1975) para Andalucía occidental y Castilla La Mancha (0,02 y 0,008 respectivamente), ya que se ha considerado que el sistema está en una zona de transición entre ambas áreas. Los coeficientes de mineralización (k_1) se muestran en el Cuadro 2. El aporte anual de carbono al suelo (A) se ha calculado a partir de estimas de la producción de todos los tipos de biomasa del sistema, teniendo en cuenta la proporción que se devuelve al suelo. En concreto, el dato de producción de restos de poda está basado en los algoritmos de Civantos y Olid (1982). La producción de alperujo constituye un 80% de la producción de aceituna con un contenido de agua del 65% (Cegarra, 1998), mientras que el hojín constituye el 5%, con una humedad relativa del 37,5% (Guzmán y Alonso, 2008).

El contenido de C en cada insumo ha sido obtenido de diversas fuentes (Cuadro 3). En el caso de la cubierta vegetal, la distribución del C se ha calculado a partir de los datos propios sobre la producción de biomasa aérea y de los datos proporcionados por Kuzyakov y Domanski (2000) sobre la distribución del C en los distintos componentes de la biomasa de los pastizales,

que corresponden a una ratio $C_{\text{biomasa aérea}}/C_{\text{raíz}}$ de 1,5 y $C_{\text{biomasa aérea}}/C_{\text{suelo y microbiota}}$ de 6,2.

Todos los resultados han sido expresados en kilogramos equivalentes de CO_2 (kg eq- CO_2), para lo cual se ha empleado un potencial de calentamiento global (PCG) de 310 kg eq- CO_2 /kg N_2O ; 24 kg eq- CO_2 /kg CH_4 ; 1 kg eq- CO_2 /kg CO_2 (PLANETE), y de 3,67 kg eq- CO_2 /kg C secuestrado (Smith et al., 2007). El PCG del óxido nitroso y del metano serán próximamente sustituidos por los valores más recientes del IPCC (respectivamente, 298 y 25) (Smith et al., 2007).

Escenarios simulados

En el análisis de sensibilidad hemos seleccionado tres variables para comprobar el impacto de su variación dentro de un rango probable sobre el balance final de emisiones de GEI en cada tipo de manejo. Estas variables son el factor de emisión de óxido nitroso, la tasa de secuestro de carbono, y la inclusión del metano en el balance. Para ello se han elaborado 6 nuevos escenarios:

Variable Factor de emisión de N_2O

-*Escenario N_2O secano mediterráneo*: El factor de emisión de N_2O propuesto por el IPCC ha sido sustituido por el valor hallado en el único estudio publicado que calcula factores de emisión para cultivos mediterráneos de secano (Meijide et al., 2009), de 0,11 % $\text{N-N}_2\text{O}/\text{N}$ aplicado para fertilizantes químicos y de 0,1% $\text{N-N}_2\text{O}/\text{N}$ aplicado para fertilizantes orgánicos.

-*Escenario N_2O PLANETE*: se han mantenido los factores de emisión de N_2O originales, del 2% $\text{N-N}_2\text{O}/\text{N}$ aplicado para fertilizantes orgánicos y sintéticos y del 3,1% para las deyecciones *in situ* durante el pastoreo. Este factor, aunque puede ser desproporcionado en relación a las emisiones directas desde el cultivo, sí que puede estar cercano al factor total teniendo en cuenta las emisiones de nitroso que se producen fuera de la explotación a partir de compuestos nitrogenados que han sido exportados del sistema.

Variable Tasa de secuestro de C

-*Escenario Secuestro C potencial*: Se ha estimado la tasa de secuestro con el mismo procedimiento que en el escenario base, pero asumiendo que en el manejo ecológico todos los subproductos del olivar son devueltos al suelo (en el manejo actual, sólo la cubierta vegetal es devuelta al suelo), y que no existen aportes externos de materia orgánica. Es decir, este escenario mostraría el potencial del sistema ecológico para secuestrar carbono sin importar materia orgánica.

-*Escenario Secuestro C Mediterráneo*: La tasa de secuestro ha sido sustituida por el valor medio para cultivos mediterráneos obtenido en Aguilera Fernández et al. (2010), de 0,91 t C/ha^{-1} año $^{-1}$. Se trata de una tasa relativa del manejo ecológico respecto al convencional, así que la tasa de secuestro de éste último sería 0. Aunque se trata de una tasa demasiado alta para un sistema tan poco productivo como el estudiado, que tiene aportes muy pequeños de materia orgánica al suelo, se ha incluido como referencia del potencial de secuestro de

C de los cultivos ecológicos en condiciones más intensivas de fertilización orgánica.

-*Escenario Secuestro C nulo*: se ha asumido que no existen cambios en el stock de C ni en el manejo ecológico ni en el convencional. Los resultados obtenidos son los que hallarían usando la aplicación PLANETE sin incluir el módulo de secuestro de C.

Variable CH₄

-*Escenario Emisiones de CH₄ nulas*: se ha asumido que las emisiones de metano procedentes de las ovejas durante el pastoreo están fuera del sistema, ya que puede considerarse que esas emisiones no corresponden al cultivo del olivo, sino al sistema ganadero.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La producción de aceite de oliva bajo manejo ecológico es un 14% menor que bajo convencional (Cuadro 4). Esto puede achacarse a que en muchos casos la transición al manejo ecológico en un entorno tan poco productivo responde a una estrategia de diversificación de los ingresos para mantener la viabilidad de las explotaciones. De este modo, bajo manejo ecológico se incrementa el número de agricultores que integran ganado en sus explotaciones (Cuadro 1) y consecuentemente también se incrementa la producción de cubierta vegetal y la carga ganadera del sistema (Cuadro 4), consolidándose la producción de ovino como complemento a la de aceite en el agroecosistema diversificado. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Milgroom et al. (2007) también en la comarca de Los Pedroches, quienes encontraron que los agricultores ecológicos tras su conversión habían reducido la labranza, eliminado el uso de herbicidas e incrementado la integración ganadera, técnicas que se asociaron a un mayor contenido de carbono en el suelo. Esta diversificación productiva y el cambio en las técnicas de manejo del suelo tienen, en efecto, profundas consecuencias sobre el balance de emisiones de GEI de cada sistema.

Así, bajo ambos tipos de manejo los olivares de Los Pedroches presentan niveles de emisión muy bajos (Cuadro 5), de 341 kg CO₂-eq ha⁻¹ año⁻¹ en ecológico y 493 en convencional, que contrastan con los 4,4-3,2 toneladas CO₂-eq ha⁻¹ año⁻¹ que contabilizaron Flessa et al. (2002) en una rotación de cultivos en el sur de Alemania. Puede observarse que el conjunto de las emisiones directas e indirectas de GEI (excluyendo secuestro) es similar en ambos estilos de manejo, pero la distribución de gases es distinta. En el manejo ecológico se reducen las emisiones de CO₂ debido al ahorro de insumos, pero se incrementan las de N₂O y especialmente las de CH₄, lo que está asociado a la integración del ganado rumiante. Paralelamente, el aumento de *inputs* orgánicos al suelo genera un incremento de la tasa de secuestro de C. En suma, a través del ahorro de emisiones fósiles, junto con el secuestro de C, se alcanzan unas emisiones por litro (l) de aceite de oliva ecológico un 19% menores que las del convencional, a pesar de una productividad menor y unas emisiones extra asociadas a la integración ganadera.

La reducción de las emisiones de N₂O y CO₂ en el sistema ecológico se debe tanto a la eliminación de la mayoría de insumos sintéticos (fertilizantes químicos, herbicidas y fitosanitarios), que generan emisiones durante su

fabricación, como a la reducción de las energías directas, especialmente del gasoil empleado sobre todo para las tareas de labranza (Fig. 1). El combustible es la principal fuente de emisiones, suponiendo un 64,3% del total en convencional y un 52,1% en ecológico. Este menor nivel de emisiones asociadas al combustible en el manejo ecológico también se ha encontrado en otros agroecosistemas mediterráneos como la vid en el sur de Francia (Kavargiris et al., 2009) o el olivar en Grecia (Kaltsas et al., 2007).

La generalización de las cubiertas vegetales y de la integración ganadera en ecológico tiene efectos complejos sobre el balance de emisiones. Por un lado, el aumento de la fijación de nitrógeno atmosférico, debido a la mayor cantidad de biomasa producida y a la introducción en algunos casos de la veza, junto con las deyecciones producidas por el ganado que aprovecha las cubiertas, generan un incremento de las emisiones de N_2O , que llegan a duplicar las del manejo convencional. Aquí queda de manifiesto el carácter extensivo del manejo de los sistemas estudiados, ya que en convencional los aportes de nitrógeno son tan escasos, que la fijación simbiótica de N de la cubierta vegetal basta para superar las emisiones generadas durante su fabricación y su aplicación al suelo. Junto con el óxido nitroso se incrementa también el metano, generado por la fermentación de la celulosa en el rumen de las ovejas. Este pasa a ser en ecológico el segundo factor en importancia como fuente de emisiones, con un 26%, frente al 6,7% que representa en convencional.

Por otro lado, sin embargo, las cubiertas vegetales permiten un incremento drástico del aporte anual de carbono al suelo, que pasa de los 32 a los 306 kg C $ha^{-1} año^{-1}$, el cual se ve reflejado en las predicciones de la tasa de secuestro computadas con el modelo Henin-Dupuis, que establecen que existiría una mineralización neta del COS en el manejo convencional de 106 kg eq- CO_2 , y un secuestro de 52 kg eq- CO_2 en ecológico. A pesar de la incertidumbre de estos resultados, debemos considerar que el modelo no tiene en cuenta las mejoras en el suelo que tienen lugar gracias a las cubiertas vegetales, como la protección frente a la erosión. Este factor puede dar lugar a pérdidas de carbono muy importantes (Lal, 2003), especialmente con fuerte pendiente y bajo patrones climáticos mediterráneos. Estas pérdidas de materia orgánica causadas por la erosión se ven drásticamente reducidas cuando existe una cubierta vegetal (Gómez et al., 2009, Ordóñez-Fernández et al., 2007). Tampoco se ha considerado el efecto de reducción de la tasa de mineralización del suelo que pueda tener la disminución de la intensidad del laboreo, que también puede ser importante en cultivos mediterráneos (Aguilera Fernández et al., 2010). El pastoreo de la cubierta podría tener, además, efectos positivos sobre el almacenamiento de C en el suelo (Silver et al., 2010), un factor que tampoco ha sido tenido en cuenta.

El análisis de sensibilidad de la variable Factor de Emisión de N_2O muestra que este parámetro determina el nivel de emisiones de N_2O que se obtendrá en el balance (Cuadro 6). Los valores propuestos llevan a casi duplicar las emisiones de N_2O obtenidas con el factor del IPCC, en el caso del factor implementado en PLANETE, hasta reducirlas en un 90% en el manejo ecológico usando el factor del secano Mediterráneo. Sin embargo, el N_2O no representa una fracción muy importante en el balance de GEI de este agroecosistema extensivo, así que a pesar de los cambios tan amplios en los valores obtenidos, la diferencia entre las emisiones totales del manejo ecológico y del convencional apenas se ve

afectada (Fig. 2). Hay que destacar que, dadas las importantes variaciones en las emisiones obtenidas en función del factor empleado, es previsible que en sistemas con aportes de N más abundantes, como los cultivos de regadío o cultivos de secano más intensivos, este factor ha de tener una mayor influencia en el balance final.

Las tres alternativas propuestas para el secuestro de C se sitúan en un rango C razonable dentro de lo publicado en la literatura científica. El escenario Secuestro medio Mediterráneo, que es el límite superior escogido, es, sin embargo, poco probable para este agroecosistema, que es muy poco productivo e importa muy poca materia orgánica, y que por tanto no puede mantener los niveles de aporte necesarios para alcanzar tasas de secuestro tan elevadas (Cuadro 7). Pero sí que sirve de referencia para compararlo con las salidas del modelo Henin-Dupuis (escenario Base, Cuadro 5, y escenario Secuestro Potencial Ecológico, Cuadro 7), y comprobar que las tasas de secuestro que se obtienen no son tan elevadas como podría hacernos pensar su comparación con el resto de emisiones del sistema. Son, en consecuencia, estimaciones probables, que nos hacen ver que si en el olivar ecológico del área estudiada se devolviesen al suelo todos los residuos orgánicos generados, sin necesidad de aportes externos, podría secuestrarse más eq-CO₂ que el emitido en el conjunto del sistema, lográndose una mitigación neta de GEI (Escenario Secuestro Potencial Ecológico, Cuadro 7). En cambio, si no incluimos el secuestro de C en nuestra contabilidad de GEI (escenario Secuestro C nulo), el balance de gases queda completamente equilibrado en ecológico y convencional, quedando enmascarado el efecto que las técnicas de conservación del suelo empleadas en agricultura ecológica tienen en la mitigación del cambio climático. La variable Secuestro de C, por tanto, a diferencia de los factores de N₂O, sí que tiene una profunda relevancia en los balances finales de estos sistemas. Las emisiones del sistema ecológico frente al convencional pasan del 102% si asumimos que no existe secuestro a un 69% en el escenario base, -25% en el escenario Secuestro C Potencial y -596% en el escenario Secuestro medio Mediterráneo (Fig. 3). La validez de estos datos, obtenidos mediante el modelo de Henin-Dupuis aún debe ser comprobada, y quizá el modelo pueda ser sustituido por otro más complejo, como Roth C, SOCRATES, u otros, que requieren más información para alimentarlos pero ofrecen resultados más fidedignos y ya han sido aplicados en condiciones mediterráneas (Roth C, Nieto et al., 2010, SOCRATES, Boellstoff, 2009).

La variable Emisión de CH₄ también tiene impactos notables en el balance de GEI, si bien no tan drásticas (Cuadro 8, y Fig. 4), que reducen las emisiones en ecológico respecto al convencional desde el 69% hasta el 51%. Aquí habría que considerar que la producción de ovino acoplada al sistema olivarero en el manejo ecológico está ahorrando emisiones asociadas a esta producción en algún otro lugar, así que una comparación ecuánime de un sistema bajo monocultivo con uno diversificado debería considerar también esas cargas ambientales ahorradas. Este es un procedimiento habitual en los análisis de ciclo de vida que comparan sistemas donde existen coproductos (Lechón et al., 2005).

CONCLUSIONES

La aplicación del modelo PLANETE a este agroecosistema mediterráneo ha demostrado ser una herramienta muy útil para calcular el potencial de calentamiento global (PCG), ofreciendo una primera aproximación del peso relativo de cada factor en el balance total de emisiones. No obstante, la incorporación del módulo de secuestro de C, junto con el análisis de sensibilidad realizado, ha revelado que la sustitución de algunos factores clave por valores plausibles en condiciones mediterráneas puede alterar de forma muy notable el balance obtenido, apuntando a la necesidad de una reparametrización bien ajustada del modelo que se ajuste a las características particulares de cada sistema estudiado. En este sentido, aún queda una gran labor para ajustar todos los factores relevantes abarcando la diversidad de agroecosistemas mediterráneos.

En sistemas extensivos y con baja productividad como los estudiados, el óxido nitroso no supone una fracción significativa en el balance de emisiones, mientras que sí lo son el metano y el C secuestrado. Pese a todo, los resultados indican la necesidad de disponer de estimas fiables del factor de emisión en el secano mediterráneo ya que en cultivos más intensamente fertilizados el empleo de uno u otro factor puede modular el balance total de una forma drástica.

El secuestro de carbono ha demostrado ser el factor clave en el balance de GEI en los agroecosistemas estudiados. Una primera aproximación mediante un modelo simple de dinámica del carbono en el suelo revela un potencial para compensar completamente las emisiones generadas en el manejo ecológico, de forma que resultaría en un sistema casi neutro en CO₂. De cualquier modo, la cuantificación del secuestro de C, ya sea mediante mediciones empíricas o mediante modelos ya validados, es necesaria en la estimación del PCG de los agroecosistemas mediterráneos, habida cuenta de la importancia de este factor en el balance de emisiones y del amplio rango en que se mueven las estimaciones manejadas.

Los balances de emisiones a la atmósfera de gases traza (N₂O y CH₄) penalizan la integración agrícola-ganadera cuando se compara con sistemas agrícolas fertilizados con abonos químicos. En rigor, habría que descontar de los sistemas mixtos las cargas ambientales correspondientes al subsistema ganadero o, más estrictamente, aplicar los modelos al conjunto de la producción agraria en ambos casos. La aplicación PLANETE permite separar las cargas ambientales de la producción vegetal y animal. Estos resultados no se han incluido por cuestiones de espacio y porque los criterios de segregación aún deben ser revisados.

Los resultados de este estudio muestran el enorme potencial de la agricultura ecológica como herramienta de mitigación del cambio climático, cuya valoración por la sociedad, sin embargo, no es posible sin una cuantificación precisa de la emisión de GEI. Existe, por tanto, una fuerte necesidad de realizar investigación de base en el ámbito mediterráneo que aporte información sobre los factores de emisión y tasas de secuestro.

Estos resultados indican también cómo las aproximaciones integradas ofrecen una visión completa del sistema y por tanto son imprescindibles para la realización de estimaciones sobre la emisión neta de GEI en cultivos bajo distintas condiciones de manejo. Por otro lado, este estudio aún debe

completarse con réplicas en olivares situados en áreas con otras características agroecológicas, así como con otros cultivos representativos de la agricultura mediterránea.

REFERENCIAS

- Aguilera Fernández, E., L. Lassaletta, B. S. Gimeno, J. L. Porcuna, 2010. Emisión directa e indirecta de gases de efecto invernadero y secuestro de carbono en los agroecosistemas mediterráneos: una revisión integrada. Actas XIX Congreso de la Sociedad Española de Agricultura Ecológica, 6-9 de Octubre de 2010, Lleida.
- Albuquerque, J. A., J. Gonzalez, D. Garcia y J. Cegarra. 2007. Effects of a compost made from the solid by-product ("alperujo") of the two-phase centrifugation system for olive oil extraction and cotton gin waste on growth and nutrient content of ryegrass (*Lolium perenne* L.). *Bioresource Technology* 98(4): 940-945.
- Alonso, A.M. 2003. Análisis de la sostenibilidad agraria: el caso del olivar en la comarca de Los Pedroches (Córdoba). Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba (inédita).
- Alvarez, S., M. A. Soriano, B. B. Landa and J. A. Gomez. 2007. Soil properties in organic olive groves compared with that in natural areas in a mountainous landscape in southern Spain. *Soil Use and Management* 23(4): 404-416.
- Bayer, C., T. Lovato, J. Dieckow, J. A. Zanatta y J. Mielniczuk. 2006. A method for estimating coefficients of soil organic matter dynamics based on long-term experiments. *Soil & Tillage Research* 91(1-2): 217-226.
- Bechini, L. y N. Castoldi. 2009. On-farm monitoring of economic and environmental performances of cropping systems: Results of a 2-year study at the field scale in northern Italy. *Ecological Indicators* 9(6): 1096-1113.
- Bochu, J.L., 2002. PLANETE: méthode pour l'analyse énergétique des exploitations agricoles et l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre. Colloque national: Quels diagnostics pour quelles actions agroenvironnementales? 10 et 11 octobre, Solagro, pp. 68-80.
- Boellstorff, D. L. 2009. Estimated soil organic carbon change due to agricultural land management modifications in a semiarid cereal-growing region in Central Spain. *Journal of Arid Environments* 73(3): 389-392.
- Cegarra, J. 1998. Elaboración y uso agrícola de abonos obtenidos a partir de residuos de almazara. Primeras Jornadas Mediterráneas de Olivar Ecológico. *ECOLIVA'97*, vol. 1. Cámara Oficial de Comercio e Industria de la Provincia de Jaén, Jaén, pp. 115-121.
- Civantos, L., y M. Olid. 1982. Los ramones de los olivos. *Agricultura* 605, 978-980.
- del Prado, A., D. Chadwick, L. Cardenas, T. Misselbrook, D. Scholefield y P. Merino. 2010. Exploring systems responses to mitigation of GHG in UK dairy farms. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 136(3-4): 318-332.

- Flessa, H., R. Ruser, P. Dorsch, T. Kamp, M. A. Jimenez, J. C. Munch and F. Beese. 2002. Integrated evaluation of greenhouse gas emissions (CO₂, CH₄, N₂O) from two farming systems in southern Germany. *Agriculture Ecosystems & Environment* 91(1-3): 175-189.
- Foraster, L., M. J. Lorite, I. Mudarra, A. M. Alonso, A. Pujadas-Salvá y G. Guzmán. 2006. Evaluación de distintos manejos de las cubiertas vegetales en olivar ecológico. En: VII Congreso de la Sociedad Española de Agricultura Ecológica, 18–23 de Septiembre de 2006. Sociedad Española de Agricultura Ecológica, Zaragoza. N 14. Edición en CD.
- Gómez, J. A., M. G. Guzmán, J. V. Giráldez y E. Fereres. 2009. The influence of cover crops and tillage on water and sediment yield, and on nutrient, and organic matter losses in an olive orchard on a sandy loam soil. *Soil and Tillage Research* 106(1): 137-144.
- Gómez, H, F. Pomares, A. García, C. Baixauli, J. M. Aguilar, J. L. Porcuna, M. J. Verdú, A. Hermoso, F. Tarazona, M. Estela, B. Cabot, T. Campos, D. Gómez de Barreda y R. Coscollá: 2000. Evaluación de un sistema de producción ecológica de cultivos hortícolas en Valencia. Fundación Cátedra Iberoamericana. Colección cursos y conferencias. 4
- Guzmán, G. I. y A. M. Alonso. 2008. A comparison of energy use in conventional and organic olive oil production in Spain. *Agricultural Systems* 98(3): 167-176.
- IPCC, 2006. Guidelines for national greenhouse gas inventories. Vol. 4. Agriculture, Forestry and other land uses. En: Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (Eds). 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme. IGES, Japón.
- Kaltsas, A. M., A. P. Mamolos, C. A. Tsatsarelis, G. D. Nanos y K. L. Kalburtji 2007. Energy budget in organic and conventional olive groves. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 122(2): 243-251.
- Kavargiris, S. E., A. P. Mamolos, C. A. Tsatsarelis, A. E. Nikolaidou y K. L. Kalburtji. 2009. Energy resources' utilization in organic and conventional vineyards: Energy flow, greenhouse gas emissions and biofuel production. *Biomass and Bioenergy* 33(9): 1239-1250.
- Kong, A. Y. Y., S. J. Fonte, C. van Kessel y J. Six. 2009. Transitioning from standard to minimum tillage: Trade-offs between soil organic matter stabilization, nitrous oxide emissions, and N availability in irrigated cropping systems. *Soil & Tillage Research* 104(2): 256-262.
- Kuzyakov, Y. y G. Domanski 2000. Carbon input by plants into the soil. Review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde* 163(4): 421-431.
- Lal, R. 2003. Soil erosion and the global carbon budget. *Environment International* 29(4): 437-450.

- Lechon, Y., H. Cabal, et al. 2009. Energy and greenhouse gas emission savings of biofuels in Spain's transport fuel. The adoption of the EU policy on biofuels. *Biomass & Bioenergy* 33(6-7): 920-932.
- Meijide, A., L. Garcia-Torres, A. Arce y A. Vallejo. 2009. Nitrogen oxide emissions affected by organic fertilization in a non-irrigated Mediterranean barley field. *Agriculture Ecosystems & Environment* 132(1-2): 106-115.
- Milgroom, J., M. A. Soriano, J. M. Garrido, J. A. Gomez and E. Fereres. 2007. The influence of a shift from conventional to organic olive farming on soil management and erosion risk in southern Spain. *Renewable Agriculture and Food Systems* 22(1): 1-10.
- Nieto, O. M., J. Castro, E. Fernandez y P. Smith. 2010. Simulation of soil organic carbon stocks in a Mediterranean olive grove under different soil-management systems using the RothC model. *Soil Use and Management* 26(2): 118-125.
- Ordoñez-Fernandez, R., A. Rodriguez-Lizana, A. J. Espejo-Perez, P. Gonzalez-Fernandez y M. M. Saavedra. 2007. Soil and available phosphorus losses in ecological olive groves. *European Journal of Agronomy* 27(1): 144-153.
- Robertson, G. P., E. A. Paul y R. R. Harwood. 2000. Greenhouse gases in intensive agriculture: Contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere. *Science* 289(5486): 1922-1925.
- Sanchez-Martín, L., A. Meijide, L. Garcia-Torres y A. Vallejo. 2010. Combination of drip irrigation and organic fertilizer for mitigating emissions of nitrogen oxides in semiarid climate. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 137(1-2): 99-107.
- Sanchez-Monedero, M. A., M. L. Cayuela, C. Mondini, N. Serramia y A. Roig 2008. Potential of olive mill wastes for soil C sequestration. *Waste Management* 28(4): 767-773.
- Schulze, E. D., S. Luysaert, P. Ciais, A. Freibauer, I. A. Janssens, J. F. Soussana, P. Smith, J. Grace, I. Levin, B. Thiruchittampalam, M. Heimann, A. J. Dolman, R. Valentini, P. Bousquet, P. Peylin, W. Peters, C. Rodenbeck, G. Etiope, N. Vuichard, M. Wattenbach, G. J. Nabuurs, Z. Poussi, J. Nieschulze, J. H. Gash y T. CarboEurope. 2009. Importance of methane and nitrous oxide for Europe's terrestrial greenhouse-gas balance. *Nature Geoscience* 2(12): 842-850.
- Silver, W. L., R. Ryals y V. Eviner. 2010. Soil Carbon Pools in California's Annual Grassland Ecosystems. *Rangeland Ecology & Management* 63(1): 128-136.
- Smith, P., D. Martino, Z. Cai, D. Gwary, H. Janzen, P. Kumar, B. McCarl, S. Ogle, F. O'Mara, C. Rice, B. Scholes y O. Sirotenko. 2007. Agriculture. Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. O. R. D. B. Metz, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer. Cambridge, Cambridge University Press.

- Smith, P., D. Martino, Z. Cai, D. Gwary, H. Janzen, P. Kumar, B. McCarl, S. Ogle, F. O'Mara, C. Rice, B. Scholes, O. Sirotenko, M. Howden, T. McAllister, G. Pan, V. Romanenkov, U. Schneider, S. Towprayoon, M. Wattenbach y J. Smith. 2008. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences* 363(1492): 789-813.
- Sofo, A., V. Nuzzo, A. M. Palese, C. Xiloyannis, G. Celano, P. Zukowskyj y B. Dichio. 2005. Net CO₂ storage in mediterranean olive and peach orchards. *Scientia Horticulturae* 107(1): 17-24.
- Steenwerth, K. L. y K. M. Belina. 2010. Vineyard weed management practices influence nitrate leaching and nitrous oxide emissions. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 138(1-2): 127-131.
- Tames, C. 1975. Equilibrio del humus en los suelos cultivados. Fertilizantes Nitrogenados Nacionales. *Boletín Informativo*, 52 (1): 1-8
- Vallejo, A., L. Garcia-Torres, J. A. Diez, A. Arce y S. Lopez-Fernandez. 2005. Comparison of N losses (NO₃⁻, N₂O, NO) from surface applied, injected or amended (DCD) pig slurry of an irrigated soil in a Mediterranean climate. *Plant and Soil* 272(1-2): 313-325.
- Veysset, P., M. Lherm, y D. Bébin. 2010. Energy consumption, greenhouse gas emissions and economic performance assessments in French Charolais suckler cattle farms: Model-based analysis and forecasts. *Agricultural Systems* 103: 41-50.
- Wood, S., y A. Cowie. 2004. A Review of Greenhouse Gas Emission Factors for Fertiliser Production. *Bioenergy Task*. IEA. 38.

TABLAS

Cuadro 1. Características del manejo orgánico y convencional en el olivar de la comarca de Los Pedroches (% de agricultores que practican cada técnica)

| | Convencional | Ecológico |
|-------------------------------------|--------------|-----------|
| Labranza | 100 | 91,3 |
| Cubiertas vegetales | 51 | 82,6 |
| Herbicidas | 35,7 | 0 |
| Abonos verdes | 0 | 17,4 |
| Estiércol/compost | 0 | 17,5 |
| Trituración restos de poda | 0 | 0 |
| Fertilización del suelo | 75 | 43,5 |
| Fertilización foliar/fertirrigación | 64,3 | 47,8 |
| Control de enfermedades | 82,1 | 73,9 |
| Trampas (<i>Bactrocera oleae</i>) | 25 | 65,2 |
| Otro control de insectos | 53,8 | 0 |

| | | |
|-----------------------|------|------|
| Poda de verano | 100 | 100 |
| Integración de ganado | 30,8 | 86,9 |
| Cosecha manual | 100 | 100 |

Cuadro 2. Coeficientes de humificación (k1) de los distintos tipos de materia orgánica aportados al suelo (%)

| Aporte orgánico | k1 | Fuente |
|---------------------------------------|-----|------------------------------|
| Cubierta vegetal (aérea) | 8 | Bechini y Castoldi 2009 |
| Cubierta vegetal (raíces) | 15 | Bechini y Castoldi 2009 |
| Cubierta vegetal (suelo y microbiota) | 100 | Kuzyakov y Domanski 2000 |
| Estiércol y compost | 50 | Gómez et al. 2000 |
| Alperujo | 60 | Sánchez-Monedero et al. 2008 |
| Hojín | 20 | Sofo et al. 2005 |
| Ramón | 35 | Sofo et al. 2005 |

Cuadro 3. Contenido de C en los distintos tipos de materia orgánica aportados al suelo (% sobre materia seca)

| Aporte orgánico | % C | Fuente |
|-----------------|------|------------------------------|
| Compost | 48,9 | Alburquerque et al. 2007 |
| Estiércol ovino | 30,7 | Sánchez-Martín et al. 2010 |
| Alperujo | 53 | Sánchez-Monedero et al. 2008 |
| Hojín | 58 | Mann, 1986 |
| Ramón | 55 | Lapuerta et al. 2007 |

Cuadro 4. Producción media de aceite y materia orgánica en el olivar de Los Pedroches según el tipo de manejo

| Manejo | Aceite de oliva ¹ | Alperujo ² | Hojín ² | Ramón ² | Cubierta ³ | CG ⁴ |
|--------------|------------------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|-----------------|
| Convencional | 201 | 283 | 30 | 430 | 154 | 0,15 |
| Ecológico | 172 | 246 | 26 | 429 | 383 | 0,6 |

¹ litros ha⁻¹ año⁻¹

² kg materia seca ha⁻¹ año⁻¹

³kg materia seca biomasa aérea ha⁻¹ año⁻¹

⁴ (carga ganadera) n° ovejas ha⁻¹ año⁻¹

Cuadro 5. Balance de GEI en el olivar de los Pedroches ecológico y convencional

| Escenario | Manejo | CO ₂ ¹ | N ₂ O ¹ | CH ₄ ¹ | Secuestro CO ₂ ¹ | Total | IC ² |
|-----------|--------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|--|-------|-----------------|
| Base | Convencional | 347 | 14 | 26 | 106 | 493 | 2,45 |
| Base | Ecológico | 260 | 32 | 103 | -55 | 341 | 1,98 |

¹ kg CO₂-eq ha⁻¹ año⁻¹

² (Intensidad de Carbono) kg CO₂-eq l aceite⁻¹

Cuadro 6. Balance de GEI en el olivar de Los Pedroches aplicando los factores de emisión de N₂O de PLANETE y del secano Mediterráneo (kg CO₂-eq ha⁻¹ año⁻¹)

| Escenario | Manejo | CO ₂ | N ₂ O | CH ₄ | Secuestro CO ₂ | Total |
|--------------------------------------|--------------|-----------------|------------------|-----------------|---------------------------|-------|
| N ₂ O PLANETE | Convencional | 347 | 27 | 26 | 106 | 506 |
| N ₂ O PLANETE | Ecológico | 260 | 39 | 103 | -55 | 347 |
| N ₂ O secano mediterráneo | Convencional | 347 | 6 | 26 | 106 | 485 |
| N ₂ O secano mediterráneo | Ecológico | 260 | 2 | 103 | -55 | 310 |

Cuadro 7 Balance de GEI en el olivar de Los Pedroches aplicando distintas tasas de secuestro de C (kg CO₂-eq ha⁻¹ año⁻¹)

| Escenario | Manejo | CO ₂ | N ₂ O | CH ₄ | Secuestro CO ₂ | Total |
|----------------------------|--------------|-----------------|------------------|-----------------|---------------------------|-------|
| Sec. C potencial ecológico | Convencional | 347 | 14 | 26 | 106 | 493 |
| Sec. C potencial ecológico | Ecológico | 260 | 32 | 103 | -521 | -125 |
| Sec. C medio Mediterráneo | Convencional | 347 | 14 | 26 | 106 | 493 |
| Sec. C medio Mediterráneo | Ecológico | 260 | 32 | 103 | -3337 | -2941 |
| Secuestro C nulo | Convencional | 347 | 14 | 26 | 0 | 387 |
| Secuestro C nulo | Ecológico | 260 | 32 | 103 | 0 | 396 |

Cuadro 8. Balance de GEI en el olivar de Los Pedroches asumiendo una emisión nula de CH₄ (kg CO₂-eq ha⁻¹ año⁻¹)

| Escenario | Manejo | CO ₂ | N ₂ O | CH ₄ | Secuestro CO ₂ | Total |
|----------------------|--------------|-----------------|------------------|-----------------|---------------------------|-------|
| CH ₄ nulo | Convencional | 347 | 14 | 0 | 106 | 467 |
| CH ₄ nulo | Ecológico | 260 | 32 | 0 | -55 | 237 |

FIGURAS

Figura 1. Composición del balance de GEI en el olivar de Los Pedroches

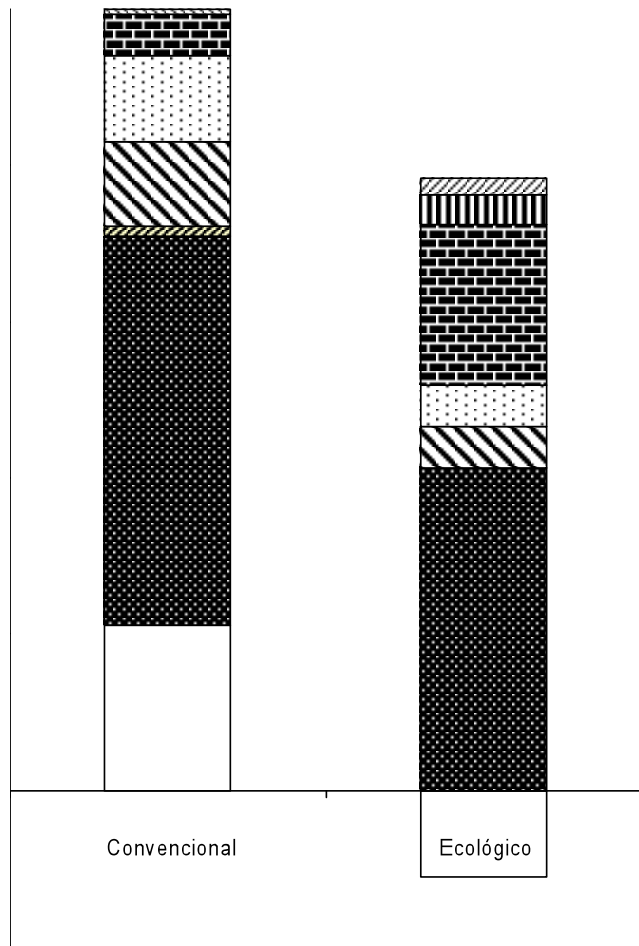


Figura 2. Análisis de sensibilidad de la variable Factor de Emisión de N₂O

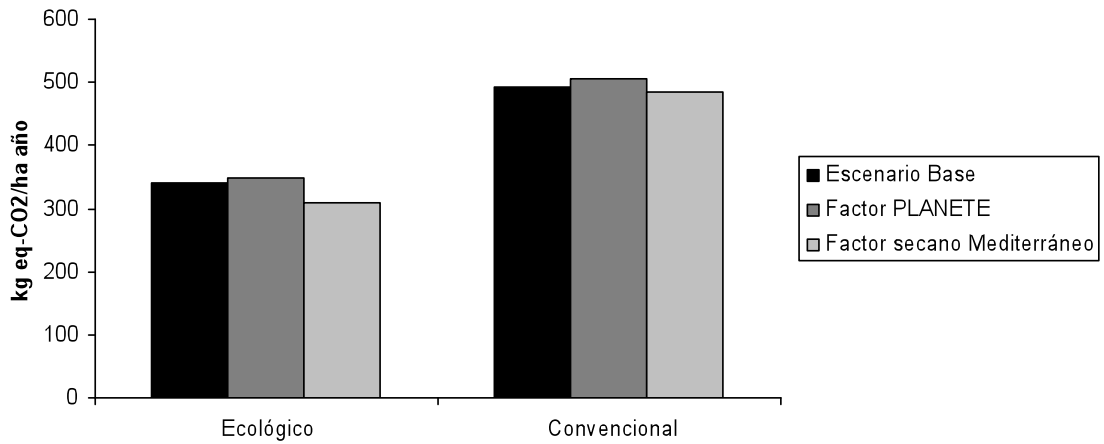


Figura 3. Análisis de sensibilidad de la variable Secuestro de C

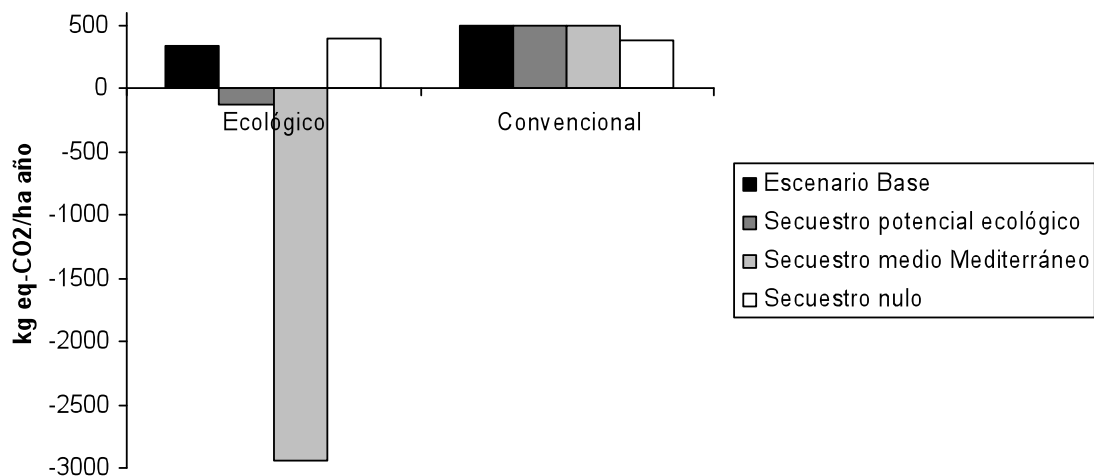


Figura 4. Análisis de sensibilidad de la variable Emisión de CH₄

