

Documento de Trabajo 12/02



Análisis del uso de la tierra para el diseño de políticas de mitigación y adaptación al cambio climático

Mohamed Taher Kahil y José Albiac

**Departamento de Economía Agraria
Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria**



Para obtener copias adicionales de este documento de trabajo, contactar con:

José Albiac
Unidad Economía Agraria
CITA-DGA
Avenida de Montañana 930
50.059 Zaragoza
Spain

email: maella@unizar.es
Teléfono: +34 976716351
Fax: +34 976716335

1. Introducción

En las últimas décadas ha aumentado la preocupación social sobre el cambio climático y sus impactos sobre los seres humanos, el medioambiente, y la economía. En la actualidad, existen evidencias científicas que las rápidas variaciones climáticas que se están ocurriendo son resultados de las actividades humanas que emiten gases de efecto invernadero (GEI) a la atmosfera (Wigley 1999). El aumento de la concentración de GEI en la atmosfera afecta el balance energético de la tierra y causa como consecuencia el calentamiento de la superficie terrestre, la reducción de las precipitaciones, y la subida del nivel del mar así como el aumento de la frecuencia y severidad de los fenómenos extremos como sequia, inundación, y olas de calor (Houghton 2001). Varios estudios señalan que el sur de Europa y la Cuenca Mediterránea se verán especialmente afectados por el cambio climático con reducciones en el rendimiento de los principales cultivos, el movimiento de cultivos típicos de la región hacia el norte, sequías más frecuentes y intensas, y graves daños medioambientales (Olesen y Bindi 2002, IPCC 2007 y 2011).

Las emisiones GEI se producen por el uso intensivo de energías fósiles en el transporte y la industria, la intensificación de la agricultura que sustituye a la agricultura tradicional de bajo coste medioambiental, y los cambios de uso de la tierra. El sector agrícola tiene doble influencia en el cambio climático, por un lado es una fuente importante de emisiones GEI, y por otro es un sumidero que fija carbono de la atmósfera.

La intensificación de la agricultura en décadas recientes es el resultado de las fuertes inversiones en nuevas tecnologías de producción como la mecanización de las actividades agrícolas, la modernización de los sistemas de riego, el uso de fertilizantes y fitosanitarios, y la ganadería intensiva. Estos avances tecnológicos han incrementado la productividad agrícola y ganadera, asegurando una fuente estable y barata de alimentos, unas mayores rentas para los agricultores, y un proceso de desarrollo de las zonas rurales. Sin embargo, el desarrollo de este tipo de agricultura ha generado impactos medioambientales negativos como las emisiones GEI, la escasez de agua, y la contaminación de los recursos hídricos y de la tierra por nutrientes, pesticidas, y sales. La agricultura se considera responsable de 14 por cien de las emisiones GEI globales en 2004 (IPCC 2007).

El problema para controlar las emisiones contaminantes de origen agrícola es su carácter difuso, por lo que dificulta identificar el responsable del origen y el volumen de las emisiones. Además, la implementación de políticas de cambio climático podría tener impactos negativos sobre la renta de los agricultores y el desarrollo rural. Este hecho hace que el diseño de políticas adecuadas de cambio climático en el sector agrario es una tarea difícil.

Sin embargo, la agricultura se considera una fuente de alternativas de bajo coste para la mitigación del cambio climático en comparación con otros sectores de la economía, con el secuestro del carbono atmosférico por los suelos, los bosques, y la vegetación leñosa, y la reducción de las emisiones GEI generadas por las actividades agroganaderas reduciendo la intensidad de producción y mejorando las prácticas agrarias, además de la generación de la bioenergía, poco contaminante, que sustituye a la energía fósil, la principal fuente de emisiones GEI. Varios trabajos señalan que la inclusión de la agricultura en los sistemas de regulación de GEI permite alcanzar de manera coste-eficiente los objetivos de estabilización del clima proporcionando oportunidades para reducir el esfuerzo de mitigación de GEI en los sectores industrial y energético, donde el coste de mitigación es más elevado (Hediger 2006, Vermont y De Cara 2010, Pérez Domínguez et al. 2004).

2. Emisiones GEI: estado de situación

Como respuesta a los cambios climáticos que se están sucediendo en la tierra, se adoptó en 1992 la Convención Marco sobre Cambio Climático que fue firmada por ciento sesenta países en la conferencia de las Naciones Unidas sobre medioambiente y desarrollo. La convención constituyó la iniciativa de carácter multilateral más relevante y permitió el establecimiento de un marco legal de acción de los países frente al cambio climático. Otra iniciativa importante fue la elaboración del Protocolo de Kioto en 1997, en el que se comprometieron los países participantes de reducir un 5 por cien las emisiones GEI globales en el periodo 2008-2012 respecto al 1990.

La Unión Europea como firmante del Protocolo de Kioto se comprometió reducir un 8 por cien sus emisiones GEI (341 Mt CO₂eq por año para EU-15) en el periodo 2008-2012. La Unión Europea ha puesto otro objetivo más ambicioso de reducir sus emisiones GEI un 20 por cien en 2020, y se ha comprometido aumentarlo hasta el 30 por cien si se establece un acuerdo internacional de reducción de emisiones.

Para alcanzar estos objetivos, los países europeos están llamados a reducir las emisiones de los sectores incluidos en el sistema de comercio de emisiones (EU-ETS) principalmente el sector industrial y energético, y aumentar sus balances de emisiones con los mecanismos flexibles y las actividades de uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura (LULUCF). Los límites establecidos para los sectores incluidos en el EU-ETS obligan indirectamente los países miembros a reducir las emisiones de los sectores difusos no incluidos en el EU-ETS (construcción, transporte, agricultura) para alcanzar el objetivo del Protocolo de Kioto. En 2009, se ha establecido un objetivo de reducir un 10 por cien las emisiones de los sectores no incluidos en el EU-ETS en 2020 respecto al 2005 (OJ 2009).

Las emisiones de la UE-15 en 2008-2009 (primer periodo de cumplimiento del Protocolo de Kioto) están un 10 por cien menos que las emisiones del 1990, cumpliendo así con el objetivo del 8 por cien establecido. Se estima que las actividades LULUCF y los mecanismos de flexibilidad reducirán más las emisiones GEI con 2,7 por cien en el resto del periodo de cumplimiento del Protocolo de Kioto. La Unión Europea pone de manifiesto la importancia de los sectores no incluidos en el EU-ETS para contribuir al esfuerzo de mitigación de GEI (EEA 2010a).

España emite 368 Mt CO₂eq representando el 10 por cien de las emisiones GEI de la UE-15. Las emisiones predominantes provienen del uso de la energía (77%), la agricultura (11%) y la industria (7%). Por gases el dióxido de carbono (CO₂) (81%), el metano (CH₄) (10%) y el óxido nitroso (N₂O) (7%) (MARM 2011a).

Para cumplir con el objetivo de reducir las emisiones GEI del Protocolo de Kioto por parte de la Unión Europea se ha asignado a España un techo de emisión en el periodo de cumplimiento del protocolo de 15 por cien más respecto al 1990. Sin embargo, las emisiones GEI de España han aumentado de manera continua desde el 1991 hasta 2009, donde las emisiones están un 27 por cien más respecto al 1990.

La agricultura contribuye al inventario de GEI principalmente con las emisiones de óxido nitroso y metano. Las actividades de cultivo emiten óxido nitroso de manera directa por el uso de los fertilizantes nitrogenados minerales y orgánicos, y de manera indirecta por las pérdidas de nitrógeno en los cursos de agua. Las actividades ganaderas, en especial los rumiantes, emiten metano durante el proceso de la fermentación entérica. El manejo de los estiércoles es otra fuente importante de emisiones de óxido nitroso y de metano.

El sector agrario español emite 39 Mt CO₂eq, de los que 45 por cien son emisiones de óxido nitroso de los suelos agrícolas, 32 por cien son emisiones de metano de la fermentación entérica, y 21 por cien son emisiones de óxido nitroso y metano generados por la gestión de estiércoles.

En Aragón, las emisiones GEI alcanzan los 18 Mt CO₂eq, lo que supone un 5 por cien de las emisiones totales de España. Este nivel de emisión está un 16 por cien más respecto al 1990 cumplimiento con el límite anual de emisión (22 Mt CO₂eq) establecido por la Estrategia Aragonesa de Cambio Climático y Energías Limpias (EACCEL) para el periodo 2008-2012, de acuerdo con el objetivo del Plan Nacional de Asignación. La EACCEL (2011) señala que el sistema productivo en Aragón es menos intensivo en carbono y que existe un desacoplamiento entre el crecimiento económico y las emisiones de CO₂.

La distribución de emisiones por sector en Aragón es: las industrias del sector energético (29%), la agricultura (20%), la combustión en las industrias manufactureras y de la construcción, y los procesos industriales (19%), el transporte (18%) y otros sectores (14%). Los sectores difusos no incluidos en el EU-ETS tienen un peso importante contribuyendo con casi el 60 por cien en el total de las emisiones GEI.

La agricultura emite 3,6 Mt CO₂eq, de los que el 45 por cien son emisiones de óxido nitroso de los cultivos y el 55 por cien son emisiones de óxido nitroso y metano de la ganadería (Cuadro 1).¹ Las emisiones del sector agrario representan 20 por cien de las emisiones totales de Aragón, doblan en porcentaje a la contribución del sector a las emisiones totales de España. El sector agrario de Aragón contribuye con 9 por cien a las emisiones GEI agrarias en España, es el sector aragonés que más contribuye a las emisiones GEI de España, en término porcentual. Dentro de los sectores difusos en Aragón, la agricultura es el que más contribuye a las emisiones GEI con 35 por cien, es más que el transporte que genera 31 por cien de las emisiones

¹ Estas estimaciones son las oficiales del Gobierno de Aragón. Nuestras estimaciones indican que más del 70 por cien de las emisiones son de la ganadería.

Cuadro 1. Emisiones GEI del sector agrario en Aragón

Categoría de emisión	Cantidad de emisión (10³ t CO₂eq)	%
Emisiones directas y indirectas de cultivos	1.642	45,4
Fermentación entérica	700	19,3
Gestión de estiércoles	1.248	34,5
Cultivo de Arroz	25	0,7
Quema de residuos agrícolas	5	0,1
Total	3.620	100

Fuente. EACCEL (2011)

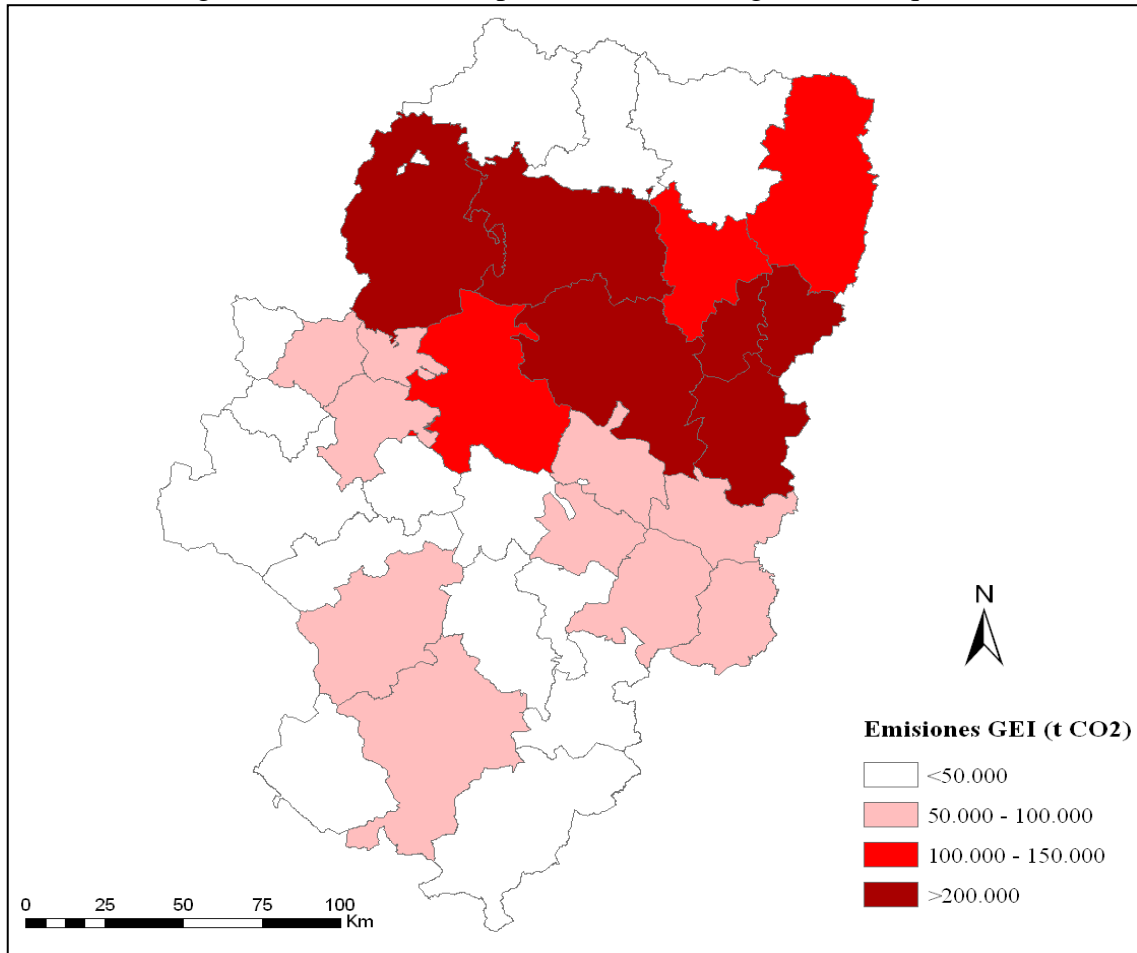
Las comarcas con mayores emisiones en Aragón son Bajo Cinca, Cinca Medio, Cinco Villas, La Litera y Monegros donde se localizan los cultivos intensivos de regadío (maíz, arroz, melocotón) y que también concentran las cabañas de porcino y vacuno (Figura 1).

Las actividades de uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y la silvicultura (LULUCF) desempeñan un papel importante para alcanzar los objetivos de reducción de emisiones GEI. En el Protocolo de Kioto se indica la importancia de proteger y mejorar los sumideros y los depósitos de GEI, promover las prácticas sostenibles de gestión forestal, la forestación y la reforestación, y promover las prácticas agrícolas sostenibles, para eliminar carbono de la atmosfera. El secuestro de carbono por las actividades LULUCF permite a los países firmantes del Protocolo de Kioto aumentar sus niveles de emisión sin afectar sus balances netos de emisión.

El secuestro de carbono por las actividades LULUCF en España es 29,2 Mt CO₂eq. Los bosques fijan el 88 por cien del carbono. El secuestro de carbono ha aumentado un 50 por cien en 2009 respecto al 1990. Las actividades LULUCF emiten también gases de efecto invernadero por los cambios de uso de la tierra y los incendios forestales. Estas emisiones alcanzan las 600.000 t CO₂eq. Las absorciones netas de carbono por las actividades LULUCF mejoran el balance de emisión de España en un 8 por cien (MARM 2011a).

En Aragón, la superficie forestal arbórea alcanza un millón y medio de hectáreas. Esta superficie permite fijar unos 3,4 Mt CO₂eq por año, aproximadamente un 18 por cien de las emisiones GEI de la región y unos 14 por cien de la fijación de carbono por los bosques en España. Las comarcas de Gúdar-Javalambre, Ribagorza, Sobrarbe, Jacetania, Cinco Villas y Sierra de Albarracín fijan más de la mitad de la captura de bosques en Aragón.

Figura 1. Emisiones GEI por comarca en Aragón (t CO₂eq/año)



3. Impactos del cambio climático sobre agricultura y recursos hídricos

En la actualidad, existen muchas evidencias que el cambio climático está afectando varios ecosistemas por el aumento de la temperatura, el cambio en los patrones de las lluvias, y el aumento de la frecuencia, severidad y la extensión espacial de los fenómenos extremos como sequía, inundación y olas de calor.

La agricultura es un sector altamente vulnerable al cambio climático. A nivel global, se estima que el potencial de producción de alimentos aumentará con una subida de la temperatura entre 1 y 3 °C, y un aumento de la concentración de CO₂, mientras que disminuirá si la temperatura supera los 3 °C, con muchas discrepancias regionales.²

² Resultados de varios estudios muestran que un aumento ligero de la temperatura, con aumento de la concentración de CO₂ tendrá un efecto beneficioso ligero para la producción agrícola en las regiones en latitudes altas y medias mientras que el efecto es negativo en latitudes bajas. Un aumento severo de la temperatura en más de 3 °C tendrá un efecto negativo en todas las regiones (IPCC 2007).

En el sur de Europa y en la Cuenca Mediterránea, los impactos del cambio climático serán adversos, se estima que se reducirán los rendimientos de cultivos como maíz, cebada y girasol y aumentaran su variabilidad, además de la disminución de las superficies de tierras idóneas para cultivos característicos de la zona y el movimiento de algunos cultivos como maíz y viñedo hacia el norte o hacia las regiones altas (Olesen y Bindi 2002, Ciscar et al. 2010).

Los fenómenos extremos de sequía y inundación afectaran negativamente la producción agrícola sobre todo en las regiones menos preparadas con agricultura tradicional de subsistencia. También se estima que el cambio climático causara problemas serios de erosión de suelos, degradación de tierras agrícolas, problemas de salinidad, y aumento del riesgo de incendios forestales y de plagas y enfermedades.

El cambio climático afectara también los recursos hídricos, las disponibilidades hídricas se reducirán entre 10 y 30 por cien en las zonas áridas y semiáridas por la reducción de las precipitaciones y la cubierta de nieve, las regiones afectadas por la sequía se extenderán y aumentará el estrés hídrico (IPCC 2007).³

La demanda de agua de los cultivos aumentará por el aumento de temperatura y evapotranspiración y habrá menos agua disponible en las cuencas por la reducción de escorrentía y percolación. Un estudio realizado en el noreste de España muestra que por cada aumento de temperatura de 1 °C en el periodo de crecimiento del viñedo, las necesidades hídricas aumentan entre 6 y 14 por cien (Ramos et al. 2008).

La demanda del agua de riego aumentara también por la posibilidad de crecimiento de las superficies de regadío que sustituyen al secano poco rentable y dependiente del clima, se estima que la superficie de regadío aumentara más del 20 por cien en el sur de Europa en 2030 (EEA 2005).

La agricultura consume el 70 por cien de las extracciones de agua a nivel global lo que ha generado problemas serios de escasez de agua en los ríos más grandes en las regiones áridas y semiáridas como en el Nilo, Yellow, Tigris, Éufrates, Murray-Darling, Colorado y Rio grande por las grandes extracciones de las aguas superficiales y la sobreexplotación actual de las aguas subterráneas promovida por la disminución de los

³ Se estima que el número de personas que sufren del estrés hídrico aumentará sustancialmente entre 262 y 983 millones de personas en 2050, en el escenario de emisión A2. Las regiones más afectadas por el aumento del estrés hídrico son la cuenca Mediterránea, el sur y centro de África, Europa, y el sur y centro de América (Arnell 2004).

costes de bombeo (Albiac et al. 2010). Se estima que las extracciones de agua por la agricultura subirán un 11 por cien en 2050 por el aumento de la demanda de alimentos, sin considerar los efectos del cambio climático (FAO 2011).

El cambio climático agravará la situación de escasez de agua, las necesidades de agua de riego aumentarán entre 1 y 3 por cien en 2020 y entre 2 y 7 por cien en 2070. En China e India, los países con las superficies de riego más grandes en el mundo, las necesidades de riego subirán hasta un 15 por cien en 2020 (IPCC 2007). La situación es más grave en la Cuenca Mediterránea donde se estima que la demanda de agua de riego aumentará entre 20 y 30 por cien (Giorgi y Lionello 2008). Por otra parte, la demanda de agua urbana e industrial aumentará entre 14 y 83 por cien (MEA 2005). Este aumento de la demanda de agua combinado con la reducción de las disponibilidades hídricas en cuenca tendrá impactos negativos sobre la calidad de agua, los ecosistemas acuáticos, el potencial hidroeléctrico y las actividades recreativas, y complicará el proceso de planificación hídrica a nivel de cuenca.

El cambio climático causará también problemas de calidad de agua por la variabilidad de la temperatura y el aumento de la intensidad de las precipitaciones con impactos sobre los ecosistemas acuáticos y la salud humana. Chang et al. (2001) han detectado un aumento del 50 por cien de la carga de nitrógeno en los cursos de agua en la región de Chesapeake debido a las lluvias torrenciales. En el río Fraser en Canadá, se ha detectado un aumento de la temperatura del agua hasta los 20 °C en varios tramos, esta temperatura se considera el umbral a partir del cual se degradan los hábitats del salmón (Morrison et al. 2002). La intrusión salina se agravará por las fuertes extracciones de aguas subterráneas y la baja recarga en periodos de sequía. La recarga de los acuíferos en la cuenca mediterránea se reducirá drásticamente en más del 70 por cien en 2050 (IPCC 2007).

La sequía es un impacto grave del cambio climático. Según el IPCC (2011) existen evidencias científicas con un nivel de confianza aceptable que algunas regiones del mundo han experimentado sequías más intensas y largas, sobre todo en el sur de Europa y en África occidental por efectos del cambio climático. Según la EEA (2010b), el número de áreas y personas afectadas por la sequía y la escasez de agua en Europa se ha duplicado alcanzando el 13 por cien entre 1976 y 2006. Proyecciones climáticas realizadas por Lehner et al. (2005) utilizando varios modelos climáticos muestran que la

frecuencia de sequía podría aumentar hasta 10 veces en 2070 en el sur de Europa, especialmente en España, Portugal, y partes de Francia y Turquía.

La Agencia Europea del Medioambiente (EEA 2009) define la sequía como un fenómeno natural que consiste en la disminución sustancial de las disponibilidades hídricas por un periodo de tiempo determinado y que afecta negativamente a todos los componentes del ciclo hidrológico. Durante el periodo 1961-2006, las precipitaciones se han reducido entre 30 y 60 mm por década en el sur de Europa y en la Cuenca Mediterránea. El número de días secos consecutivos se estima que alcanzara los 120 días en 2089 mientras que no supera los 20 días en el norte de Europa. Por otra parte, el caudal de los ríos que es una medida de la disponibilidad de agua varía ampliamente en Europa de 50 mm por año en el sur a 1.500 mm por año en el norte. Varios estudios señalan que el caudal de los ríos disminuirá en el sur de Europa entre 2 y 20 por cien por el aumento de las extracciones y el cambio climático (Arnell 2004, Alcamo et al. 2007).

La agricultura es el mayor consumidor de agua en el sur de Europa con extracciones entre 60 y 80 por cien. La agricultura de regadío tiene una gran importancia en la región por su contribución significativa a la generación de renta, al empleo y al desarrollo rural. En España, la superficie de regadío representa el 21 por cien de las tierras de cultivo y utiliza el 77 por cien de los recursos hídricos. La agricultura de regadío en España contribuye con más del 50 por cien a la producción agrícola.

La escasez de agua y la degradación de su calidad en España ha sido consecuencia del crecimiento de las actividades económicas. El enorme desarrollo de la agricultura de regadío en las últimas décadas es la principal causa de la escasez de agua, mientras que las actividades industriales y urbanas han generado los problemas de calidad. Las extracciones de agua han aumentado más del doble entre los años 1960 y 2004, alcanzando los 32.500 hm³, de los que el 77 por cien se utilizan por el sector agrícola por el aumento de la superficie de regadío de 1,8 a 3,5 millones de hectáreas. Los problemas de escasez y degradación de los recursos hídricos en España están más concentrados en el sur, donde se localizan los cultivos intensivos y rentables como frutales y hortalizas. En las cuencas del sur, los recursos hídricos están sujetos a elevadas presiones. En algunos casos las extracciones superan los recursos renovables como ocurre en la cuenca del Segura con sobreexplotación del 27 por cien.

En España se proyecta que el cambio climático tendrá impactos negativos sobre los recursos hídricos. Se han realizado varios estudios para evaluar estos impactos, MIMAM (2000) presenta una estimación de las aportaciones hídricas en tres escenarios climáticos de aumento de la temperatura, reducción de las precipitaciones y duplicación de la concentración de CO₂ atmosférico, los resultados muestran una reducción de las aportaciones en régimen natural entre 5 y 14 por cien en 2030 en comparación con datos de los noventa. El análisis realizado permite concluir que el sureste peninsular, la cuenca del Guadiana, y la cuenca del Ebro, son las áreas donde el impacto sobre los recursos hídricos es más severo. MARM (2005) ha presentado estimaciones de las aportaciones hídricas en régimen natural en 2030 y 2060. El estudio indica que se producirán descensos en las aportaciones hídricas hasta el 14 por cien en 2030 y hasta el 17 por cien en 2060. Iglesias (2009) señala que las disponibilidades hídricas en España se reducirán entre 5 y 7 por cien a mitad del siglo veintiuno considerando varios escenarios climáticos. La reducción de las disponibilidades hídricas podría ser más grave a finales del siglo alcanzando los 40 por cien en algunas cuencas del sur y en el margen derecha del Ebro. CEDEX (2010) ha realizado un estudio sobre el impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos en régimen natural y muestra que las precipitaciones se reducirán un 17 por cien, la temperatura aumentara unos 5 °C, y la evapotranspiración potencial subirá un 21 por cien a finales del siglo veintiuno. Este hecho hace que se reducirán la escorrentía, la humedad del suelo, y la recarga subterránea de 28, 35 y 27 por cien, respectivamente. Estas estimaciones confirman la hipótesis de que el cambio climático agudizara la escasez de agua en España.

La cuenca del Ebro se encuentra en el noreste de la península ibérica y ocupa una superficie de 85.362 km², es la cuenca más extensa de España, y representa el 20 por cien del territorio español. Los recursos hídricos renovables se estima que alcanzan los 13.900 hm³. Las extracciones anuales de agua son 8.150 hm³, de los que 7.800 hm³ son de origen superficial y 350 hm³ provienen de fuentes subterráneas. La superficie de regadío en la cuenca supera las 800.000 ha, de las que más del 50 por cien se sitúan en Aragón. El regadío utiliza unos 7.340 hm³ y los sectores urbano e industrial utilizan unos 570 hm³. El trasvase de agua al País Vasco y Cataluña alcanza unos 180 hm³.

La explotación de los recursos hídricos en la cuenca del Ebro alcanza el 60 por cien, más que el nivel de explotación nacional (34%) y por debajo de los niveles de explotación de las cuencas del Segura y Júcar de 127 y 90 por cien, respectivamente.

Este indicador muestra que los recursos hídricos en la cuenca del Ebro están sujetos a elevadas presiones.

Estas presiones pueden aumentarse bajo la amenaza del cambio climático y si no se contralasan las actividades económicas. Existe algunas estimaciones del impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos en la cuenca del Ebro como las de Samper et al. (2007) que estiman los impactos del cambio climático en varias sub-cuencas de la cuenca del Ebro y señalan que existe una fuerte variabilidad espacio-temporal en cuanto a las aportaciones hídricas y que habrá una disminución media de 19 por cien de las aportaciones en 2100. Los autores señalan que los efectos serán más severos en el margen derecha del Ebro y que los impactos serán mayores en los meses de verano que en los de invierno. Otras estimaciones de Iglesias (2009) muestran que las disponibilidades hídricas se reducirán menos de 5 por cien y la demanda de agua de riego aumentara más de 5 por cien en 2050.

Las elevadas presiones sobre los recursos hídricos podrían generar daños económicos y medioambientales serios. De hecho las tendencias actuales muestran un no-cumplimiento entre 10 y 30 por cien de los límites establecidos para el caudal mínimo ecológico en algunas sub-cuencas de la cuenca del Ebro (CHE 2008). Si no se toma medidas adecuadas de adaptación al cambio climático la situación puede agravarse en el futuro próximo.

El cambio climático tendrá varios impactos sobre los recursos hídricos por un lado se reducirán las entradas de agua por la reducción de las precipitaciones y el aumento de su variabilidad, y por otro aumentaran las extracciones de agua por el aumento de la temperatura y la demanda evaporativa. El aumento de las extracciones causaran problemas medioambientales serios como la reducción de los caudales de los ríos y los niveles de agua en los acuíferos, los lagos, y los humedales, lo que amenaza al estado ecológico de las masas de agua y pone en peligro las especies acuáticas endémicas valiosas y la calidad del agua. Como Ejemplo, la expansión de la superficie de regadío en la cuenca del Alto Guadiana de 20.000 ha en los setenta a 130.000 ha en los noventa y las excesivas extracciones de las aguas subterráneas sobre todo durante los periodos de sequia han generado una reducción drástica del nivel de las aguas subterráneas, lo que ha causado la degradación de Las Tablas de Daimiel, un humedal importante en España declarado reserva de biosfera por el UNESCO, de 1.500 a 100 ha (Fornes et al. 2000). Otro aspecto importante a considerar es que las extracciones excesivas de las

aguas subterráneas y la reducción de las precipitaciones causan pérdidas de la materia orgánica del suelo y la liberación del carbono secuestrado lo que aumente más las emisiones GEI a la atmosfera.

Varios estudios han estimado los costes de daño del cambio climático y señalan que los impactos económicos podrían ser graves si no se toma medidas para mitigar las emisiones GEI y adaptarse a los impactos. Stern (2007) muestra que sin intervención para mitigar las emisiones GEI, los costes y riesgos del cambio climático serán equivalentes a una pérdida anual entre 5 y 20 por cien del PIB mundial.

Ciscar et al. (2010) estiman que los impactos del cambio climático sobre la agricultura, los ríos, los sistemas costeros y el turismo en Europa en 2080 podrían alcanzar entre los 25.000 millones € en un escenario de aumento de la temperatura de 2,5 °C, y los 65.000 millones € en un escenario de aumento de la temperatura de 5,4 °C con subida del nivel del mar, causando pérdidas de bienestar entre 0,2 y 1 por cien.

Los costes económicos y medioambientales del aumento de la escasez de agua y de la frecuencia y severidad de la sequia son elevados en las regiones áridas y semiáridas, y representan una amenaza a las actividades humanas y los ecosistemas. La Comisión Europea (EC 2007a) señala que 11 por cien de la población europea sufre de problemas relacionados con la escasez de agua y que los costes de sequia en Europa alcanzan los 3.300 millones € por año. En los Estados Unidos, se estima que el coste de la sequia está entre 1.000 y 8.000 millones \$ por año (FEMA 1995, NOAA 2008).

La Comisión Europea (EC 2007b) señala que los costes de la sequia del 2005 en España han alcanzado los 2.500 millones € para el sector agrícola y los impactos medioambientales se han evaluado en 114 millones €. Pérez y Hurlé (2009) han estimado los costes de la sequia del 2005 en la cuenca del Ebro, sus resultados muestran que las pérdidas de renta del sector agrícola han superado los 400 millones € con la desaparición de 11.000 puestos de trabajo.

Las proyecciones futuras de la situación climática muestran que probablemente las variables climáticas siguieran cambiando, aumentara la frecuencia de los días más calientes hasta 10 veces y las temperaturas máximas subirán entre 1 y 3 °C a mitad del siglo veintiuno y entre 2 y 5 °C a final del siglo, las precipitaciones se reducirán en algunas regiones y aumentara la frecuencia de las lluvias torrenciales. Las sequias se intensificaran a finales del siglo veintiuno por la reducción continua de las

precipitaciones y el aumento de la evapotranspiración, especialmente en el sur de Europa, la Cuenca Mediterránea, América central y Méjico, el noreste de Brasil y el sur de África. La humedad del suelo se reducirá y el número de días secos consecutivos aumentara, verificando la tendencia de la intensificación de la sequia (IPCC 2011).

4. Cambio climático y políticas europeas medioambientales

La preocupación europea por el medioambiente y la conservación de los recursos naturales ha aumentado en los últimos años y se han elaborado varias políticas para la protección de los recursos naturales y la mejora del medio rural. Estas políticas han contribuido a la mitigación y la adaptación al cambio climático con diferentes efectos sobre las emisiones GEI y la capacidad adaptativa de la sociedad europea a los impactos del cambio climático. Un ejemplo son la Política Agraria Común (PAC), las directivas sobre los recursos hídricos (Directiva Marco del Agua, Directiva de Nitratos, Comunicación de la UE sobre escasez y sequia, Directiva de inundaciones), la Directiva de Control y Prevención Integrada de la Contaminación (IPPC), la propuesta de la UE sobre la creación de una Directiva Marco de Suelo, y el Libro Blanco de la UE sobre adaptación al cambio climático. A continuación se examinan las políticas y directivas más relevantes, que constituyen las normas legislativas que definen las medidas de mitigación de GEI en la agricultura y de adaptación al cambio climático para los recursos hídricos.

4.1. La Política Agraria Común

La Política Agraria Común es una de las políticas más importantes y uno de los elementos esenciales del sistema institucional de la Unión Europea. La PAC gestiona las ayudas destinadas al sector agrícola europeo y contribuye a la protección de los precios de los productos agrícolas. Este instrumento político ha contribuido al incremento de la productividad agrícola, ha permitido modernizar el sector agrario, y ha impulsado el desarrollo de las aéreas rurales en Europa.

Sin embargo, los efectos medioambientales adversos que genera el sector agrario como la contaminación de los recursos hídricos por los nutrientes y la contaminación atmosférica, además del exceso de la producción agrícola en los años noventa han sido las primeras señales a la Unión Europea para cambiar el enfoque político agrario de un apoyo total a la producción agrícola a un apoyo a la sostenibilidad agrícola y una

reevaluación del papel del sector primario en cuanto a su relación con los ecosistemas y la generación de servicios medioambientales.

Las sucesivas reformas de la PAC han contribuido progresivamente a la sostenibilidad de la producción agrícola, la conservación de los recursos naturales y la protección de los ecosistemas. En la reforma del 1992, se ha reducido la protección a los precios agrícolas y se ha fomentado el uso de las medidas agroambientales a través de la compensación económica a los agricultores por realizar prácticas menos rentables económicamente y que son ambientalmente beneficiosas.

La Agenda 2000, otra reforma de la PAC incluyó las cuestiones medioambientales mediante reducciones más importantes de la protección de los precios de los productos agrícolas y el establecimiento de las ayudas directas condicionadas por el cumplimiento de obligaciones medioambientales. Además de la definición de la política de desarrollo rural.

La reforma intermedia de la PAC del 2003 tuvo como objetivo limitar el gasto agrícola, mantener las rentas agrarias, e integrar el medioambiente en la producción agraria a través de la condicionalidad. Además la reforma intermedia pretendía orientar la producción agraria hacia los productos y servicios deseados por la sociedad, promover los sistemas agrarios tradicionales y de gran valor ambiental así como responder a las expectativas de la sociedad en el ámbito ambiental. La reforma ha introducido el “pago único por explotación” basado en el desacoplamiento de las ayudas a la renta de las producciones, y en la condicionalidad de las ayudas al cumplimiento de los requisitos medioambientales, la salud pública, y el bienestar animal.

La reforma del 2008 conocida como el “chequeo sanitario” se ha establecido para seguir modernizando el sector agrícola europeo, simplificar la PAC y eliminar las restricciones gravadas sobre los agricultores. El objetivo principal de esta reforma es permitir que los agricultores respondan mejor a las señales del mercado y enfrentan los nuevos desafíos socioeconómicos y medioambientales como la mitigación y la adaptación al cambio climático, la gestión de los recursos hídricos, y la protección de la biodiversidad. Para este fin se han puesto en marcha una serie de medidas como la eliminación gradual de las cuotas de leche, el desacoplamiento total de las ayudas excepto para algunas especies animales, ayudas a los sectores con problemas especiales, la ampliación del régimen de pago único por superficie hasta 2013, la supresión de la retirada obligatoria de tierras, y un apoyo financiero más importante al desarrollo rural.

En la actualidad, la PAC contribuye significativamente al esfuerzo de mitigación y adaptación al cambio climático, el desacoplamiento de las ayudas a la renta de la producción garantiza a los agricultores un nivel mínimo de ingreso y promueve la gestión sostenible de los recursos naturales y el mantenimiento de los ecosistemas. Este nivel mínimo de ingresos sirve también como garantía para los agricultores si ocurre algún fenómeno extremo como sequía o inundación. Las medidas agroambientales permiten reducir la intensificación de la agricultura, fomentar la forestación, potenciar la agricultura ecológica, y garantizar el bienestar animal, lo que reduce las emisiones GEI del sector y potencia el secuestro de carbono por los bosques y los suelos agrícolas. También los agricultores que no cumplen las normas medioambientales establecidas en cuanto a las prácticas agrarias, la salud humana y el bienestar animal podrían ser penalizados mediante reducciones parciales o totales de las ayudas. Sin embargo, la eliminación de la retirada obligatoria de tierras puede tener efectos negativos sobre el balance de carbono en los suelos.

Los programas de desarrollo rural de la PAC promueven el desarrollo sostenible de las áreas rurales lo que garantiza el crecimiento económico de estas áreas pero también la protección del medioambiente a través del apoyo económico a los proyectos de desarrollo rural sostenible como la iniciativa Leader, los programas de formación y asesoramiento a los agricultores, y los proyectos de la modernización del sector agrícola y la valorización de los productos forestales. También, existe un importante apoyo a la producción y el uso de las energías renovables y la eficiencia energética mediante el mejor aprovechamiento de la biomasa y los subproductos ganaderos. Varios programas de desarrollo rural han financiado la construcción de instalaciones ganaderas para un mejor aprovechamiento de los estiércoles animales y la reducción de las emisiones contaminantes que generan. Los programas de desarrollo rural permiten también recuperar las tierras agrícolas y forestales dañadas por los fenómenos naturales extremos a través de ayudas económicas e institucionales en especial en las áreas desfavorecidas.

La incorporación de la nueva dimensión climática de la PAC es importante para garantizar la sostenibilidad del sector agrario y desarrollar la capacidad adaptativa de los agricultores. En este sentido, varios instrumentos de política se han puesto en marcha para conseguir los objetivos europeos de reducir las emisiones GEI y cumplir con los acuerdos internacionales. Sin embargo, es necesario analizar de manera detallada los

impactos socioeconómicos de estas políticas a nivel local considerando además de las exigencias medioambientales, los objetivos del crecimiento económico y el desarrollo rural. También, en ausencia de un acuerdo internacional sobre cambio climático donde cooperan todos los países, parece que unas políticas medioambientales muy restrictivas podrían penalizar el sector agrario europeo y desplazar la producción a otras regiones del mundo. Los nuevos desafíos para la PAC serán el diseño y la implementación de un enfoque integrado que permite conseguir los objetivos medioambientales y evitar conflictos con los objetivos socioeconómicos. La UE indica que los principales objetivos de la PAC post 2013 serán garantizar la seguridad alimentaria y la calidad de los productos agrícolas, crear empleo y mantener la viabilidad de las áreas rurales, promover la competitividad y la sostenibilidad del sector agrario, y proteger el medioambiente considerando en especial los problemas relacionados con el cambio climático, la biodiversidad, la gestión de agua y la eficiencia energética.

4.2. La Directiva Marco del Agua

La Directiva Marco del Agua (DMA) establecida en el año 2000 representa el marco legal para la protección de las aguas continentales, costeras y subterráneas y las aguas de transición. La DMA tiene como objetivos principales: 1) la prevención del deterioro adicional, la protección y la mejora de los ecosistemas acuáticos, así como de los ecosistemas terrestres dependientes; 2) la promoción de los usos sostenibles del agua; 3) la protección y mejora del medio acuático; 4) la reducción de la contaminación de las aguas subterráneas; 5) la reducción de los efectos de inundaciones y sequías.

Respecto a las aguas superficiales, la directiva sugiere la caracterización de las distintas masas de agua y el establecimiento de condiciones de referencia hidromorfológicas y fisicoquímicas específicas para cada cuenca.

La DMA promueve la eficiencia y la sostenibilidad del uso de los recursos hídricos con mecanismos de mando y control como los límites de emisión, los estándares de calidad del agua y la instalación de estaciones de control para evitar la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas por las sustancias peligrosas, y con instrumentos institucionales y económicos como la gestión participativa del agua por cuenca, y la tarificación para recuperar los costes completos de los servicios relacionados con el uso del agua.

La gestión participativa por cuenca es una herramienta potente de gestión de los recursos hídricos. La DMA define la cuenca como la unidad básica de gestión del agua e indica la necesidad de determinar las presiones y los impactos del uso del agua a nivel de cuenca y elaborar planes de gestión sostenible que garanticen el buen uso del recurso. La directiva ha puesto como límite para finalizar los planes el año 2009. Sin embargo, varios países incluso España no han llegado a acabar los planes de todas las cuencas y están solicitando la ampliación del plazo.

Otra herramienta que propone la DMA es los costes completos de los servicios relacionados con el uso del agua. Estos costes completos han de incluir los costes financieros (los gastos de prestación y administración, de explotación y mantenimiento y los del capital), los costes medioambientales (los costes de los daños que el uso del agua supone a los ecosistemas como la salinización, la eutrofización y el deterioro de los suelos productivos), y los costes del recurso (costes de oportunidad de utilización del agua en otros usos). Por tanto, la política de tarificación se considera un mecanismo clave para paliar los problemas de escasez de agua, ya que se supone que este tipo de política permitiría reducir el uso del agua de riego. La comisión europea cree que los precios de agua forzarán a los agricultores a mejorar la eficiencia de los sistemas de riego, reducir la superficie de riego y modificar las prácticas agrícolas. Pero es discutible que los precios del agua sirven para reducir la demanda de agua de riego.

Varios estudios (Yang et al. 2003, Cornish et al. 2004, Martínez y Albiac 2006) evalúan la eficiencia del enfoque de tarificación, y muestran que el mecanismo de precios de agua no permite alcanzar una asignación adecuada del agua en regadío y no reducen las emisiones contaminantes difusas. La razón es que el agua de riego es un bien comunal (rivalidad y no exclusión) con externalidades medioambientales, y los instrumentos económicos puros no funcionan correctamente con los bienes comunales (Ostrom 2002). El enfoque de tarificación solo puede funcionar donde el agua es un bien privado, como es el caso del agua de uso urbano e industrial en red, pero no el agua para riego o para uso medioambiental.

La DMA pretende con los diferentes instrumentos de política conseguir el buen estado ecológico de todas las masas de agua en 2015, lo que no es fácil de conseguir por la falta de información estadística y de conocimientos científicos sobre los procesos biofísicos. Esta información estadística y conocimientos científicos son indispensables para el diseño de políticas y medidas razonables. Además la implementación de las

políticas requiere la cooperación de los diferentes usuarios del agua. Sin embargo, la DMA se considera una herramienta clave para el diseño de las políticas de adaptación al cambio climático en el sector de los recursos hídricos y de planificación hídrica a nivel de cuenca.

4.3. La Directiva de Nitratos

La Unión Europea aprobó en 1991 la Directiva de Nitratos para proteger los recursos hídricos superficiales y subterráneos de la contaminación difusa por nitratos de origen agrario. La directiva pretendía reducir la contaminación derivada del uso de los fertilizantes nitrogenados y los estiércoles en las actividades agrícolas.

Los estados miembros tenían que definir en su territorio las aguas subterráneas afectadas por la contaminación así como las aguas superficiales para abastecimiento urbano. El criterio para declarar una zona de acuíferos como vulnerable es que la concentración de nitratos supere los 50 mg/l N-NO₃⁻. Las zonas vulnerables son aquellas superficies territoriales cuyo drenaje da lugar a la contaminación por nitratos. También los estados miembros tenían que identificar las masas de agua, los estuarios, y las aguas costeras que están eutrofizadas o bajo riesgo de eutrofización.

Los estados miembros tenían que establecer códigos voluntarios de buenas prácticas agrarias, estos códigos incluyen medidas que regulan el tiempo y las condiciones de aplicación de los fertilizantes nitrogenados a los suelos agrícolas como la prohibición de la aplicación de nitrógeno en terrenos inclinados, escarpados o situados cerca de masas de agua, y promover el uso de buenas prácticas agrarias como la rotación de cultivos, el mantenimiento de cubiertas vegetales en invierno, y el uso de cultivos intermedios, así como disponer de una capacidad mínima de almacenamiento de los estiércoles.

Los estados miembros tenían que elaborar y aplicar programas de acción para las zonas vulnerables que tienen carácter obligatorio. Los programas incluyen las medidas de los códigos de buenas prácticas, así como medidas destinadas a limitar la aplicación de fertilizantes que contengan nitrógeno considerando las necesidades de cultivos y las diferentes fuentes de nitrógeno (fertilizantes minerales, estiércoles, materia orgánica, fijación biológica), y a poner límites para la aplicación de estiércoles ganaderos.

La directiva establece también que los estados miembros tienen que controlar la calidad de las aguas con mediciones de los compuestos nitrogenados en las masas de agua y a elaborar y presentar a la comisión europea informes cada cuatro años que

contengan una evaluación del impacto medioambiental de las medidas establecidas por la directiva sobre las masas de agua y las posibles revisiones de las zonas vulnerables y los programas de acción.

En las zonas vulnerables, la directiva establece un máximo de aplicación de fertilizantes orgánicos equivalente al aporte de 170 Kg N/ha, que se controlan mediante un libro de registro del balance de nitrógeno en cada explotación agraria. La eficacia de este mecanismo de control es cuestionable porque el control se hace de manera aleatoria sobre explotaciones individuales y no se tiene en cuenta las mediciones de la carga contaminante total procedente del polígono de riego. En el resto de zonas de cultivo, existe una limitación de 210 kg N/ha en el aporte de estiércoles que no se comprueba. Los límites establecidos por la Directiva han sido malinterpretados, porque se generalizan en cualquier situación sin tener en cuenta las necesidades de cultivos y las características biofísicas y productivas locales. Orús (2007) señala que los límites de nitrógeno orgánico establecidos no son válidos en las regiones donde el peso de los cultivos en secano es importante como en Aragón.

La Directiva de Nitratos constituye una herramienta importante para hacer frente al cambio climático mediante la paliación de los problemas relacionados con la contaminación difusa de origen agrario. El uso excesivo de abonados nitrogenados y de estiércoles contribuye al empeoramiento de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, y también al aumento de las emisiones del óxido nitroso y de metano. El uso de las buenas prácticas agrarias como recomienda la directiva reduce las emisiones contaminantes que generan los procesos productivos y aumenta el secuestro de carbono por los suelos y la vegetación.

4.4. Comunicación de la UE sobre escasez y sequia

El problema de la sequia y la escasez de agua ha aumentando considerablemente en las últimas décadas en Europa por el aumento de las extracciones de los recursos hídricos. Se proyecta que la situación se agravara en los próximos años por el efecto del cambio climático. En el año 2007, la UE ha elaborado una Comunicación sobre el desafío de la escasez de agua y la sequia en Europa (EC 2007a). La Comunicación identifica siete principales opciones políticas para tratar el problema de la escasez y sequia. Estas opciones políticas son: 1) implementar la política de la tarificación del agua; 2) mejorar la planificación de los usos del suelo y la asignación del agua entre sectores económicos; 3) mejorar el manejo y la gestión de la sequia; 4) promover la

construcción de infraestructuras adicionales de abastecimiento de agua; 5) apoyar la implementación de tecnologías y prácticas más eficientes del uso del agua; 6) promover programas educativos sobre ahorro de agua; 7) mejorar los conocimientos y la información ligados al uso de agua.

En esta Comunicación, la UE insiste sobre el enfoque de tráfico del agua incluyendo los costes medioambientales y de la escasez de agua como lo define la Directiva Marco del Agua, con además la introducción de programas obligatorios de medición del uso de agua en todos los sectores así como desarrollar incentivos fiscales para promover las prácticas eficientes del uso de agua, en particular en zonas con problemas serios de escasez de agua. También, la Comisión Europea indica la necesidad de adaptar los usos del suelo con los recursos hídricos disponibles, y cuantificar las presiones que supone el uso del agua a nivel de cuenca.

Otra propuesta de la comisión europea para enfrentar la escasez de agua y la sequía, es promover las inversiones en las infraestructuras relacionadas con la gestión del agua (almacenamiento, distribución y tratamiento) y en las tecnologías limpias y de eficiencia hídrica así como medidas de prevención del riesgo. Debido a las restricciones presupuestarias, la comisión propone integrar estas acciones dentro de los programas de desarrollo regional y local, e indica que estas medidas podrían implementarse como medidas complementarias a las medidas de gestión de la demanda de agua.

La gestión del riesgo de sequía es una medida importante que recomienda la comunicación, porque permite reducir los impactos de la sequia y aumentar la capacidad adaptativa de la sociedad. La gestión del riesgo de sequia consiste en elaborar planes de sequía con mapas de zonas de presión hídrica, diferentes niveles de alerta, sistemas de alerta, y medidas a adoptar. España, Portugal y Reino Unido son los únicos países que han elaborado planes de sequia hasta el momento.

La comisión europea indica a los estados miembros la posibilidad del empleo de los diferentes instrumentos financieros que proporciona la UE para enfrentar la escasez de agua y la sequia como el fondo de solidaridad de la UE, el mecanismo europeo de protección civil, los fondos destinados a la mejora de la gestión del agua en la agricultura de los programas de desarrollo rural, y también los fondos estructurales y de cohesión.

En España, el control y la gestión de la sequía se hace mediante sistemas de indicadores del estado hidrológico en las diferentes cuencas hidrográficas, y la elaboración de planes especiales de sequía en cada cuenca y de planes de emergencia para los abastecimientos urbanos mayores de 20.000 habitantes. Con estas medidas se pretende determinar de manera temprana las situaciones de sequía a través de la definición gradual de las situaciones de prealerta, alerta y emergencia y la elaboración de medidas adecuadas correspondientes. Las medidas son de tres tipos: medidas estratégicas que consisten en actuaciones a largo plazo de carácter institucional e infraestructural, que forman parte de la planificación hidrológica (estructuras de almacenamiento y regulación, normativas y ordenación de usos), medidas tácticas que consisten en actuaciones a corto plazo planificadas y validadas con anticipación en el marco del plan de sequía, y medidas de emergencia que se adoptan en situaciones de sequías graves. En situaciones de sequías graves, se podría permitir el uso de las aguas subterráneas mediante pozos de emergencia para aumentar las disponibilidades hídricas.

A nivel de la cuenca del Ebro, se ha elaborado un plan especial de actuación en situaciones de alerta y eventual sequía (CHE 2007). En el plan se han definido los diferentes niveles de alerta para los diferentes usos de agua y el marco legal de actuación así como las prioridades de uso. También se han determinado una serie de medidas a adoptar en cada situación como por ejemplo, en situación de prealerta se intensifica el seguimiento de la situación, la elaboración de previsiones, la concienciación de ahorro, y la información a los usuarios. En situación de alerta, se forma una comisión permanente de sequía, con la verificación continua del funcionamiento de los abastecimientos, la intensificación de las campañas de ahorro en abastecimiento, la reducción de dotaciones de abastecimiento en usos públicos (riego de parques y jardines...), la reducción de dotaciones agrícolas hasta un 10 por cien, dando prioridad al mantenimiento de los cultivos leñosos, la puesta en marcha de las infraestructuras de sequía existentes (pozos de sequía, interconexiones de sistemas...), el seguimiento y la evaluación de los caudales ecológicos, el seguimiento de los indicadores de calidad de las aguas, y en las grandes zonas regables se establece normas excepcionales de reparto de agua entre los usuarios con la posibilidad de conceder ayudas financieras al sector agrícola. En situación de emergencia, las medidas definidas en el plan consisten en la imposición de restricciones al consumo para los abastecimientos urbanos, reducción del riego de los cultivos con la posibilidad de

prohibirlo totalmente, el fomento del intercambio de derechos de uso de agua entre usuarios, la reutilización del agua, y el mantenimiento de volúmenes de reserva para abastecimiento así como la protección de los ecosistemas más vulnerables y de mayor valor.

4.5. Directiva de Control y Prevención Integrada de la Contaminación (IPPC)

La Directiva IPPC establecida por la comisión europea en 1996 y modificada en 2008, tiene como objetivo reducir la contaminación del medioambiente generada por las actividades industriales y garantizar que estas actividades sean responsables de las externalidades medioambientales negativas que causan. La directiva establece que para poder ejercer las actividades de producción, las instalaciones industriales con un elevado potencial de contaminación (energía, industria química, ganadería...) deben cumplir con unos requisitos medioambientales mínimos, sobre todo en término de emisiones de sustancias contaminantes.

La directiva incluye las instalaciones ganaderas destinadas a la cría intensiva de aves de corral y de cerdos que dispongan de más de 40.000 plazas de aves de corral, 2.000 plazas de cerdos de cría (de más de 30 kg), y 750 plazas de cerdas reproductoras.

Para recibir la licencia de la actividad, las instalaciones ganaderas deben cumplir con algunas obligaciones como el uso de medidas adecuadas de reducción de la contaminación, conocidas como las Mejores Técnicas Disponibles (MTD), el uso eficiente de la energía, y la minimización de los daños medioambientales y la restauración de los sitios de trabajo cuando se finalice la actividad. También, las obligaciones incluyen límites de emisión, medidas de manejo de los residuos, y control ambiental de las actividades.

Las MTD es una serie de medidas que deben implementar las instalaciones ganaderas para reducir las emisiones contaminantes (óxido nitroso, metano, amoniaco...) como el uso de buenas prácticas ambientales, la mejora de la alimentación del ganado, el diseño adecuado del alojamiento del ganado, el mejor aprovechamiento de los estiércoles, y el ahorro en el uso del agua y de la energía (EC 2003).

Los estados miembros son los responsables de definir las MTD que se adaptan con sus condiciones locales, y de controlar las emisiones de las instalaciones ganaderas autorizadas. Los estados miembros están llamados a presentar informes a la comisión europea cada tres años sobre la aplicación de la directiva.

5. Metodología de investigación

El objetivo de este trabajo es analizar las emisiones de gases de efecto invernadero y las emisiones de lixiviado de nitrógeno, que generan las actividades agro-ganaderas en Aragón, y evaluar varias políticas de mitigación de las emisiones GEI a la atmosfera, de control de la contaminación por nitratos de los recursos hídricos, y de adaptación de los recursos hídricos al cambio climático.

El análisis se ha llevado a cabo en la provincia de Huesca utilizando un modelo bioeconómico espacial de programación lineal de las actividades de cultivo y de la ganadería, incluyendo información sobre los usos del suelo, sistemas de riego, datos climáticos y de manejo de cultivos, datos económicos, y información sobre la contaminación que generan estas actividades.

La contaminación agrícola por los gases de efecto invernadero, los nutrientes, pesticidas y sales es una externalidad negativa de la producción, con efectos negativos medioambientales y socioeconómicos. Este tipo de contaminación genera emisiones difusas que tienen características diferentes de las emisiones puntuales de las actividades industriales e urbanas. El problema de las emisiones difusas es la dificultad de observar las emisiones en el origen y de identificar los responsables de estas emisiones a un coste aceptable, además de la complejidad y las incertidumbres ligadas a los procesos biofísicos y climáticos.

Para ello es necesario introducir instrumentos de política medioambiental para internalizar y corregir esta externalidad. Shortle y Horan (2001) y Perman (2003) presentan varios instrumentos técnicos y económicos para controlar la contaminación difusa que generan las actividades agrícolas. Los instrumentos se clasifican en tres tipos: mando y control, instrumentos económicos, e instrumentos institucionales (Cuadro 2).

5.1. Área de estudio

El estudio analiza las actividades de cultivo y de ganadería en cuatro comarcas de la provincia de Huesca: Barbastro, Cinca Medio, Hoya de Huesca y Monegros. La provincia de Huesca se encuentra en el noreste de España en el valle medio del Ebro, incluye casi la mitad de la superficie de regadío de Aragón (181.000 ha) y 2,5 millones de cabezas de porcino.

Cuadro 2. Clasificación de los instrumentos de control de la contaminación

Instrumento	Tipo de instrumento	Descripción
<i>Instrumentos de mando y control</i>		
Estándares	Control sobre la cantidad de inputs	Restricciones sobre el uso de inputs
	Control de output: cuotas o prohibiciones	Restricciones productivas sobre la cantidad de output
	Límites de emisiones	Regulación de la cantidad máxima de emisiones
<i>Instrumentos económicos</i>		
Impuestos/Subvenciones	Impuestos sobre inputs o output	Impuesto sobre inputs o output por unidad de producto
	Subvenciones para prácticas de control	Subvenciones para prácticas menos contaminantes
	Contratos para la retirada de tierra	Subvenciones para retirada de tierras de cultivo
	Pagos por responsabilidad	Pagos para compensar daños
Mercados	Mercado de inputs	Intercambio de derechos de inputs
	Mercado de emisiones	Intercambio de permisos o derechos de emisión
<i>Instrumentos institucionales</i>		
Leyes de responsabilidad	Reglas de negligencia	Leyes de responsabilidad para daños medioambientales
Enfoques voluntarios	Pagos por no cumplimiento	Pagos por no cumplimiento de los límites de emisión por parte de los contaminadores
Desarrollo de la responsabilidad social	Programas sociales y de educación	Conservación de energía y Ecoetiquetas
Facilidad de negociación	Reducción de costes de transacciones	Acceso público a la información sobre contaminación

Fuente: Perman (2003), y Shortle y Horan (2001).

Los principales cultivos en regadío de la región son alfalfa (33.000 ha), maíz (30.000 ha), cebada (53.000 ha) y trigo (20.000 ha) en cultivos herbáceos, y viñedo (2.000 ha), olivo (2.500 ha), peral (3.000 ha) y melocotonero (6.000 ha) en cultivos leñosos.

Las condiciones climáticas semiáridas y las escasas precipitaciones de la zona hacen del riego una práctica indispensable para la viabilidad de la agricultura. La distribución de la superficie de regadío por sistemas de riego es: 81.000 ha (45%) en riego por superficie, 85.000 ha (47%) en riego por aspersión, y 15.000 ha (8%) en riego localizado (Cuadro 3).

5.2. Descripción del modelo de análisis

El análisis se basa en un modelo bioeconómico regional que incluye las principales actividades de cultivo en secano y regadío, y la ganadería de porcino y vacuno. El modelo incluye un número elevado de actividades en un extenso ámbito espacial, por lo que se ha seleccionado el procedimiento de programación lineal en la modelización.

Beneke y Winterboer (1984) señalan que la programación lineal es un método adecuado para analizar problemas de asignación de recursos naturales y simular políticas agrarias y medioambientales. La razón es que permite introducir gran cantidad de información técnica y económica a un nivel de desagregación apropiado, de forma que se puedan considerar un gran número de alternativas en la toma de decisión. El modelo de programación lineal simula distintos escenarios de políticas de mitigación y adaptación al cambio climático mediante la variación de los parámetros del modelo según los distintos escenarios considerados. La precisión de los resultados depende de la exactitud de los coeficientes del modelo que definen las relaciones entre las variables.

Los modelos de programación lineal han sido empleados en la literatura para analizar el problema del cambio climático (De Cara et al. 2005, Rozakis y Sourie 2005, Macleod et al. 2010). Estos modelos permiten analizar medidas técnicas e introducir cambios en las tecnologías de producción relacionadas con las prácticas de manejo agrícola. Además, estos modelos consideran la heterogeneidad local en cuanto a las condiciones climáticas, biofísicas, socioeconómicas, y la orientación productiva de las regiones lo que no se puede hacer con los modelos de equilibrio general. Sin embargo, los modelos de programación lineal tienen el inconveniente de no considerar la interacción y los flujos de inputs y de outputs entre los diferentes sectores de la economía y los precios de los inputs y de los outputs son exógenos y fijos.

El modelo desarrollado en este estudio maximiza el margen neto de las actividades de cultivo y de la ganadería sujeto a restricciones técnicas y económicas y bajo los supuestos de que la tecnología de producción es de tipo Leontief y que los precios de producción son exógenos.⁴ El problema de optimización se define mediante la expresión:

⁴ La función de producción de Leontief es la función de producción en el que los factores de producción se usan en proporción fija, de manera que no hay sustitución entre los factores. La función viene dada por $y = \text{Min}((x_1/a), (x_2/b))$, donde y es la cantidad producida, x_1 y x_2 son las cantidades de factores de producción 1 y 2, y a y b son constantes (Varian 1998).

$$\text{Max}\Pi = \sum_{i=1}^{28} C'_i \cdot X_i + \sum_{j=1}^5 C'_j \cdot X_j$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^{28} X_i \leq d_s \quad [1]$$

$$\sum_{i=1}^{23} W_{mi} \cdot X_i + \sum_{j=1}^5 W_{mj} \cdot X_j \leq d_{wm} ; \sum_{m=1}^{12} d_{wm} \leq D_{wT} \quad [2]$$

$$\sum_{i=1}^{28} O_{mi} \cdot X_i + \sum_{j=1}^5 O_{mj} \cdot X_j \leq d_{om} ; \sum_{m=1}^{12} d_{om} \leq D_{oT} \quad [3]$$

$$X_i = \sum_{n=1}^5 \alpha_n \cdot X_{in} ; \sum_{n=1}^5 \alpha_n = 1 ; \alpha_n \geq 0 \quad [4]$$

$$X_j / Pl_j \leq L_j \quad [5]$$

$$X_i, X_j \geq 0 ; i = 1, \dots, 28 ; j = 1, \dots, 5$$

La función objetivo representa la renta neta de los agricultores igual a la suma del margen neto por hectárea C'_i de cada cultivo i ($i=1 \dots, 28$) por la superficie cultivada y el margen neto por cabeza de ganado C'_j de cada categoría de ganado j ($j=1 \dots, 5$) por el número de cabezas de ganado. El margen neto es igual a la diferencia entre ingresos y costes directos e indirectos y amortizaciones. Esta información se ha calculado a partir de los resultados económicos de las explotaciones agrícolas publicados por MARM (2009) e Iguácel y Espada (2011). X_i y X_j son las variables de elección en el problema de optimización correspondientes respectivamente a la superficie de cada cultivo i y al número de cabezas de cada categoría de ganado j .

Las restricciones de suelo [1] representan la superficie total disponible d_s para los grupos de cultivos herbáceos y leñosos, en secano y regadío. Para establecer estas restricciones, se dispone de información sobre la superficie ocupada por cada cultivo en los últimos años en término comarcal (Gobierno de Aragón 2009a). En la superficie de los cultivos en regadío se distingue entre la superficie con riego por inundación, aspersión y goteo.

Las restricciones de agua [2] determinan la cantidad de agua disponible mensualmente d_{wm} y anualmente D_{wT} , mientras que W_{mi} son los coeficientes de necesidades de agua de riego mensual de cada cultivo i y W_{mj} son los coeficientes de necesidades de agua mensuales de los animales de cada categoría de ganado j . Las

disponibilidades de agua se calculan a partir de las necesidades de agua de riego, las necesidades de agua de los animales, la superficie del conjunto de los cultivos, y el número de cabezas de ganado.

La necesidad de agua de riego del cultivo es igual a la necesidad hídrica neta dividida por la eficiencia del sistema de riego (0,6 inundación; 0,75 aspersión; y 0,9 goteo). La necesidad hídrica neta es igual a la evapotranspiración del cultivo menos la precipitación, y la evapotranspiración del cultivo se obtiene aplicando los coeficientes de cultivo K_c a la evapotranspiración de referencia. La evapotranspiración de referencia se calcula con los datos meteorológicos comarcales procedentes de la red SIAR (Servicio Integral de Asesoramiento al Regante). Para estimar estas variables se utiliza el procedimiento de Martínez Cob et al. (1998) mejorado por Tejero (2003), que consiste en utilizar el método de Hargreaves. Las necesidades de agua del ganado se han tomado de varios trabajos (Orús 2000, FAO 2006).

En las restricciones de mano de obra [3], O_{mi} y O_{mj} representan los coeficientes de necesidades de mano de obra mensual de cada cultivo i y de cada categoría de ganado j , respectivamente, y d_{om} y D_{oT} representan respectivamente las disponibilidades de mano de obra mensual y anual. La disponibilidad de mano de obra se ha calculado a partir de la información de costes proporcionada por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM 2009).

Las restricciones de agregación [4] expresan que el vector de producción de los cultivos X_i es combinación lineal convexa de los vectores de producciones históricas observadas en los últimos cinco años X_{in} , y los parámetros α_n son los coeficientes de la combinación lineal convexa. Esta restricción permite trabajar a nivel agregado sin necesidad de tener información adicional detallada sobre cada explotación individual (Önal y McCarl 1991).

La restricción [5] expresa el número disponible de plazas L_j para cada tipo de ganado j . Estos datos se han tomado de las estadísticas de la ganadería del Gobierno de Aragón (2009b). En la restricción, PL_j representa el número máximo de cabezas de cada categoría de ganado por plaza y año (1 cabeza por plaza de reproductoras de porcino; 2,3 cabezas por plaza de cebo porcino; y 1 cabeza por plaza de vacuno). En el modelo se ha asumido que la variación máxima del número de cabezas de ganado no supera el ± 15 por cien respecto a la situación actual, debido al carácter casi-fijo de las instalaciones ganaderas (De Cara et al. 2005).

Cuadro 3. Datos técnico-económicos del área de estudio

Parámetros	Valor
Superficie total (10 ³ ha)	138
Superficie en regadío/Superficie total (%)	60
Superficie en secano/Superficie total (%)	40
Superficie de herbáceos/Superficie total (%)	95
Superficie de leñosos/Superficie total (%)	5
Uso de agua (m ³ /ha)	6.400
Uso de nitrógeno mineral (kg/ha)	124
Uso de nitrógeno orgánico (kg/ha)	23
Lixiviado de nitrógeno (kg/ha)	44
Margen neto de cultivos (€/ha)	290
Número de plazas de porcino (10 ³ plazas)	875
Número de plazas de vacuno (10 ³ plazas)	50
Margen neto de ganadería (€/plaza)	30

Un componente importante en el modelo empírico son las emisiones contaminantes que generan las actividades de cultivo y de la ganadería. Para estimar las emisiones GEI, se ha seguido la metodología del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC 1996), que combina el uso de factores de emisión por unidad de actividad y datos regionales específicos de cada actividad como las superficies de cultivos, el número de cabezas de ganado, el uso de los fertilizantes nitrogenados, las excreciones de nitrógeno de la ganadería, las emisiones de nitrógeno por lixiviación y escorrentía, datos sobre sistemas de manejo de estiércoles, y datos de los inventarios de GEI a nivel nacional y regional para validar los resultados (Cuadro 4).

Las emisiones de nitrógeno por lixiviación y escorrentía se han estimado a partir de varios trabajos empíricos realizados en la zona de estudio como los de Isidoro (1999), Causapé et al. (2002), Caverro et al. (2003), Mema (2006). Los resultados de estos estudios señalan que las pérdidas de nitrógeno por lixiviación y escorrentía representan entre el 10 y el 50 por cien de los aportes de fertilizantes nitrogenados, depende de las condiciones climáticas y del manejo agrícola.

El objetivo principal de este trabajo es analizar de manera profunda las fuentes de emisiones GEI resultantes de las actividades agrarias en el área de estudio, realizar una descripción espacial de estas emisiones, y determinar la interrelación entre las diferentes actividades de producción y las emisiones. También, se pretende evaluar el coste-eficiencia de varias políticas de mitigación y adaptación al cambio climático. El modelo desarrollado se emplea para simular los efectos de las distintas medidas de política de cambio climático, y sus impactos sobre el bienestar de la sociedad, la renta de los

agricultores, el uso de factores de producción, las emisiones contaminantes, la superficie cultivada, y el tamaño de la cabaña porcina.

6. Análisis de los resultados

El área de estudio desempeña un papel importante en la economía agraria de Aragón, contribuyendo significativamente a la producción final agraria, a la creación de empleo y al desarrollo rural, así como al aprovisionamiento de cantidades importantes de alimentos de buena calidad. Sin embargo, estas actividades generan emisiones contaminantes de GEI, emisiones de lixiviado de nitrógeno, de amoníaco, y de fósforo. Estas emisiones causan daños al medioambiente como la contribución al calentamiento global, la contaminación atmosférica, y la contaminación de los recursos hídricos, poniendo en peligro los bienes y servicios que proporciona el medioambiente a la sociedad.

La renta neta que generan las actividades agrarias en el área de estudio alcanza los 67 millones €, de los que 39 millones € de las actividades de cultivo y 27 millones € de la ganadería. Entre los cultivos, los herbáceos son los más importantes con una renta de 31 millones € por las grandes superficies destinadas a estos cultivos (131.000 ha). Por termino comarcal, Monegros es la comarca más importante generando casi la mitad de la renta neta de los agricultores (31 millones €). Las demás comarcas (Barbastro, Cinca Medio, y Hoya de Huesca) generan rentas entre 10 y 14 millones € (Cuadro 5).

Las actividades agrarias en el área de estudio generan principalmente cuatro diferentes categorías de emisión: emisiones directas e indirectas de óxido nitroso (N_2O) de los suelos agrícolas, emisiones de óxido nitroso (N_2O) del manejo de estiércoles, emisiones de metano (CH_4) del manejo de estiércoles, y emisiones de metano (CH_4) de la fermentación entérica. Las emisiones GEI alcanzan las 727.000 t CO_2eq , lo que representa el 20 por cien de las emisiones GEI de origen agrario en Aragón. La ganadería emite 578.000 t CO_2eq y las actividades de cultivo emiten 149.000 t CO_2eq , representando el 80 y el 20 por cien de las emisiones de la zona, respectivamente. Este patrón de emisión difiere del patrón de emisión a nivel nacional, que es de 55 por cien para ganadería y 45 por cien para cultivos.

Cuadro 4. Factores de emisión de GEI por categoría

Categoría de emisión	Valor
Emisiones de N₂O de los suelos agrícolas (Kg N₂O/Kg N):*	
• Emisiones directas	0,01
• Emisiones indirectas	0,02
Emisiones N₂O del manejo de estiércol (Kg N₂O/kg N):	
• Porcino	0,001
• Vacuno	0,02
Emisiones de CH₄ del manejo de estiércoles (Kg CH₄/cabeza):	
• Porcino	9,31
• Vacuno de leche	15,56
• Vacuno de carne	1,18
Emisiones de CH₄ de la fermentación entérica (Kg CH₄/cabeza):	
• Porcino	0,94
• Vacuno de leche	99,76
• Vacuno de carne	54,87

Fuente: IPCC (1996) y EEA (2010a). * El factor de emisión para las emisiones directas de N₂O de los suelos agrícolas está relacionado con los aportes de fertilizantes nitrogenados y el factor de emisión para las emisiones indirectas está relacionado con las pérdidas de nitrógeno por lixiviación y escorrentía.

La fuente más importante de emisiones es el manejo de estiércoles, que emiten unas 467.000 t CO₂eq, por la concentración de la cabaña porcina de Aragón en este área. Estas emisiones representan el 65 por cien de las emisiones de la zona, y el 37 por cien de las emisiones del manejo de estiércoles en Aragón.

La comarca de Monegros emite más de la mitad de las emisiones GEI de la zona con 374.000 t CO₂eq, por las grandes superficies de regadío (44.000 ha) y la larga cabaña porcina (más de 1 millón de cabezas). Huesca es la comarca que menos emisiones GEI emite con casi 100.000 t CO₂eq, representando el 14 por cien de las emisiones totales.

Para analizar la interrelación entre las emisiones GEI y las actividades de producción, se utiliza un indicador que cuantifica la intensidad de emisión en cada comarca. Este indicador consiste en calcular la renta neta de los agricultores en Euros por tonelada de dióxido de carbono equivalente emitida. Cuanto más bajo es este indicador es más intensiva en emisiones la actividad.

Los resultados muestran que el área de estudio es una zona intensiva en emisión con 91 €/t CO₂eq, muy por encima de la intensidad de emisión de las actividades agrarias en Aragón de 339 €/t CO₂eq. La intensidad de emisión en Monegros (80 €/t CO₂eq) es la más importante, superando el promedio de la zona. Barbastro es la comarca menos intensiva en emisión con 122 €/t CO₂eq.

Cuadro 5. Emisiones GEI y las actividades económicas relacionadas

	Barbastro	Cinca medio	Hoya de Huesca	Monegros	Total
N ₂ O emisiones directas (10 ³ t CO ₂ eq)	16	12	20	45	93
N ₂ O emisiones indirectas (10 ³ t CO ₂ eq)	10	7	12	27	56
N ₂ O manejo de estiércoles (10 ³ t CO ₂ eq)	3	8	5	9	25
CH ₄ manejo de estiércoles (10 ³ t CO ₂ eq)	63	88	45	246	442
CH ₄ fermentación entérica (10 ³ t CO ₂ eq)	15	32	17	47	111
Emisiones totales (10³ t CO₂eq)	107	147	99	374	727
Renta neta de cultivos (10 ⁶ €)	9	8	5	17	39
Renta neta de ganadería (10 ⁶ €)	4	6	5	13	28
Renta neta total (10⁶ €)	13	14	10	30	67
Intensidad de emisión (€/t CO₂eq)	122	95	100	80	91

La diferencia en la intensidad de emisión entre las comarcas es el resultado de la heterogeneidad local en cuanto a las prácticas de manejo agrícola y las diferencias entre los sistemas de producción y los usos del suelo. Un ejemplo de heterogeneidad es la distribución de superficie de cultivo por sistema de riego. Los sistemas de riego avanzados (aspersión y goteo) son más eficientes que el riego por inundación. Los sistemas de riego avanzados utilizan menos agua y nitrógeno para producir las mismas cantidades de productos, además las pérdidas de agua y la carga de emisiones contaminantes es menor. Otro tipo de heterogeneidad es la extensión de la superficie de secano que es donde se depositan los excedentes de estiércoles y no existe un control riguroso sobre los aportes de fertilizantes a los cultivos.

Para corregir las externalidades negativas que causan las emisiones contaminantes de GEI, la administración pública debe diseñar políticas medioambientales adecuadas de mitigación de GEI y de adaptación al cambio climático, que orienten las prácticas agroforestales y ganaderas para hacer frente a los objetivos nacionales y globales. Sin embargo, estas políticas suponen unos costes para los agricultores y amenazan la viabilidad del sector agrícola. En este sentido, la evaluación económica de las políticas medioambientales a nivel local es un proceso importante antes de la implementación práctica de estas políticas.

Las medidas de mitigación de GEI y de adaptación al cambio climático han sido frecuentemente estudiadas en la literatura sobre cambio climático (Bates 2001, IPCC 2007, Macleod et al. 2010, Moran et al. 2011). Las principales medidas propuestas están principalmente ligadas a la mejora y la optimización del uso de los fertilizantes nitrogenados como el ajuste de los aportes de fertilizantes a las necesidades de cultivos,

el mejor aprovechamiento de los fertilizantes orgánicos, el establecimiento de normas adecuadas de aplicación de purines y el uso de equipos de aplicación más precisos, y el apoyo a la agricultura de conservación. Para la ganadería, las recomendaciones son reducir el número de animales o la producción de productos de origen animal (leche, carne), mejorar la alimentación y el alojamiento de los animales, y la mejora genética.

Para la adaptación de los recursos hídricos al cambio climático, se recomienda la optimización del uso del agua con la reducción de las pérdidas en los sistemas de riego y la percolación con medidas como el uso de tecnologías avanzadas para determinar las necesidades exactas de riego de los cultivos y la aplicación del riego deficitario, la reducción de las concesiones de agua a las comunidades de regantes, el apoyo a la modernización de regadíos y la implementación de políticas de tráfico del agua. Los instrumentos económicos han tenido un especial interés en la literatura como los impuestos sobre los inputs contaminantes, los impuestos sobre las emisiones contaminantes, los impuestos sobre el uso de la tierra, el comercio de los derechos de emisión y las subvenciones por utilizar buenas prácticas agrarias (De Cara et al. 2005, Pérez Domínguez et al. 2004, Calatrava et al. 2011).

En este trabajo, se evalúa el coste-eficiencia de algunas medidas propuestas en la literatura. Estas medidas son impuesto sobre emisión, límite de emisión del 10 por cien, control de la calidad del agua de riego, límites de fertilización, impuestos sobre inputs (nitrógeno y agua de riego), mejora de la alimentación del ganado, reducción del tamaño de la cabaña porcina del 15 por cien, la restricción del uso de agua de riego del 25 por cien. Para estas medidas se examina el efecto sobre el bienestar social, la renta de los agricultores, el uso de los inputs (nitrógeno, agua), la carga de emisiones contaminantes, y el coste de reducción de las emisiones GEI.

Los cuadros 6 y 7 muestran los resultados de simulación de la situación actual y de las diferentes medidas de mitigación y adaptación al cambio climático. La situación actual representa el escenario base de análisis que refleja la actual asignación de suelos y producción, la utilización de inputs, y el nivel de emisiones GEI y de lixiviado de nitrógeno.

Cuadro 6. Bienestar social, renta de los agricultores y uso del suelo de las medidas

Escenarios	Bienestar (10 ⁶ €)	Renta (10 ⁶ €)	Daño (10 ⁶ €)	Superficie cultivada (10 ³ ha)	Cabaña porcina (10 ³ cabezas)
Base	49	67	18	134	2.050
Impuesto emisión ($t_e=25$ €/t CO ₂ eq)	67	49	18	136	1.940
Limite emisión (10%)	49	65	16	130	1.769
Control calidad de agua	48	65	17	100	2.050
Limites fertilización	55	71	16	134	2.050
Impuesto nitrógeno ($t_n=0,5$ €/kg N)	48	58	17	114	2.050
Impuesto nitrógeno ($t_n=1$ €/kg N)	48	51	17	111	2.050
Mejora alimentación ganado	46	64	18	134	2.050
Reducción cabaña porcina (15%)	48	64	16	134	1.746
Impuesto agua ($t_w=0,02$ €/m ³)	48	57	18	119	2.050
Impuesto agua ($t_w=0,05$ €/m ³)	47	43	18	117	2.050
Reducción concesiones agua (25%)	43	61	18	118	2.050

El bienestar social de las actividades de cultivo y de la ganadería es la renta de los agricultores menos el daño medioambiental, $BS = \Pi - \lambda.e$, donde λ es el precio de los derechos de emisión de CO₂ en el mercado internacional y alcanza los 25 €/t CO₂eq, y e es la carga contaminante total de las emisiones GEL.

El bienestar social en el escenario base alcanza los 49 millones €, con 18 millones € de daño medioambiental resultante de los 727.000 t CO₂eq que emiten las actividades de cultivo y de la ganadería. La presión de las actividades agrícolas del área de estudio sobre los recursos hídricos en Aragón es importante, las extracciones de agua alcanzan los 600 hm³ y la contaminación por nitrógeno es 6.000 t N.

La elevada carga ganadera de la zona genera unas 10.600 t N en forma de estiércoles, de los que se utilizan aproximadamente el 30 por cien en la fertilización de los cultivos. El resto de las necesidades en nitrógeno de cultivos se cubren con fertilizantes nitrogenados minerales. Este hecho, genera un excedente de estiércoles que alcanza las 7.500 t N, causando contaminación de la atmosfera con emisiones de óxido nitroso y contaminación por nitratos de los recursos hídricos, por las dificultades del manejo de los estiércoles excedentarios. Este problema es general en Aragón, ya que se estima que más del 60 por cien de los estiércoles (56.000 t N) no se están aprovechando de manera eficiente.

Cuadro 7. Uso de inputs y carga contaminante de las medidas

Escenarios	Uso agua (hm ³)	Abonado (t N)	Excedente estiércol (t N)	Lixiviado N (t N)	Emisiones GEI (10 ³ t CO ₂ eq)
Base	567	19.720	7.500	5.930	727
Impuesto emisión ($t_e=25$ €/t CO ₂ eq)	569	19.900	7.110	5.980	700
Limite emisión (10%)	549	19.080	6.680	5.730	655
Control calidad de agua	503	13.140	8.800	3.950	677
Limites fertilización	567	10.750	2.170	2.670	653
Impuesto nitrógeno ($t_n=0,5$ €/kg N)	505	16.890	9.350	4.680	694
Impuesto nitrógeno ($t_n=1$ €/kg N)	497	16.300	9.550	4.520	690
Mejora alimentación ganado	567	19.720	4.640	5.930	726
Reducción cabaña porcina (15%)	558	19.720	6.260	5.930	655
Impuesto agua ($t_w=0,02$ €/m ³)	506	17.470	7.810	5.240	711
Impuesto agua ($t_w=0,05$ €/m ³)	492	16.800	8.100	5.050	706
Reducción concesiones agua (25%)	437	18.240	7.630	5.180	709

La medida de impuesto sobre emisiones GEI es una medida óptima o “first best”. Este instrumento de política medioambiental requiere la cooperación de los agricultores, para internalizar los daños medioambientales que generan sus actividades productivas y contribuir a la mejora del bienestar social.

El impuesto sobre emisiones GEI ha sido implementado en el sector agrario en varios países como Dinamarca, Irlanda, y Nueva Zelanda porque permite compensar a la sociedad los daños que causan las actividades de producción. Sin embargo, la implementación de esta medida ha tenido una fuerte oposición social por parte de los agricultores, los ganaderos y las industrias agroalimentarias por razón de las pérdidas sustanciales en los ingresos, el empleo, y la competitividad del sector agrario (Kasterine y Vanzetti 2010). Este es un problema de cooperación, en el que las autoridades públicas deben diseñar incentivos adecuados para promover la acción colectiva entre los diferentes sectores económicos y los diferentes países. Ejemplos de incentivos son la transferencia de beneficios que ocurre en los Estados Unidos, donde las industrias más contaminantes ofrecen a los agricultores pagos por cambiar sus usos del suelo hacia los usos más respetuosos con el medioambiente, y así mitigar las emisiones GEI de manera más coste-eficiente, o los pagos que reciben los agricultores en las zonas con problemas medioambientales en Italia por utilizar fertilizantes orgánicos y reciclar los residuos ganaderos (Freibauer et al. 2004).

La implementación de un impuesto sobre emisiones GEI en el área de estudio permite alcanzar el nivel óptimo de contaminación de 700.000 t CO₂eq (-4%) y el valor

máximo posible de bienestar social de 67 millones € (+37%). Esta medida genera una reducción de la actividad ganadera y un aumento ligero de las actividades de cultivo. También permite reducir el excedente de nitrógeno en forma de estiércoles unos 4 por cien. El reajuste de la actividad ganadera para reducir las emisiones GEI como respuesta a la imposición del impuesto, se explica por los costes de reducción de las emisiones GEI que son más bajos para la ganadería que los cultivos. El problema para implementar impuestos sobre emisiones GEI radica en las dificultades de medir las emisiones, de determinar los agentes responsables de estas emisiones, y de conseguir la cooperación de los grupos de interés.

Desde la perspectiva de mitigación de GEI, las medidas de límite de emisión y de reducción de la cabaña porcina son las medidas que consiguen la mayor reducción de emisiones GEI (-10%), que es igual al objetivo de reducción de GEI que establece la UE en 2020 para los sectores no incluidos en el EU-ETS. Este objetivo se consigue también con un impuesto sobre emisión superior a 40 €/t CO₂eq, causando pérdidas sustanciales en la renta de los agricultores. Otro efecto de la implementación de estas dos medidas es la reducción del excedente de nitrógeno en forma de estiércoles entre 11 y 17 por cien.

La legislación medioambiental europea como la Directiva Marco del Agua y la Directiva IPPC recomiendan el uso de los límites de emisión para conseguir objetivos medioambientales predeterminados. También, el desacoplamiento de las ayudas de la PAC para las especies animales promueve el uso de instrumentos como la reducción de la cabaña ganadera o de la producción de productos de origen animal para conseguir los objetivos medioambientales.

La implementación de los límites de emisión o la reducción de la cabaña porcina tienen prácticamente las mismas repercusiones económicas sobre la renta de los agricultores y el bienestar social. Sin embargo, el control del cumplimiento del límite de emisión es una tarea difícil de hacer y exige inversiones en estaciones de medición de emisiones GEI por parte de la administración pública.

Una alternativa al límite de emisiones GEI es el control de la calidad de las aguas de retorno y la medición de la carga de nitrógeno en los cursos de agua procedente de los polígonos de riegos. La implementación de esta medida es factible porque ya existe una red de estaciones de medición de la calidad de agua en los principales polígonos de riegos en la cuenca del Ebro. Para analizar este escenario, se ha puesto un límite de lixiviado de nitrógeno de 39 kg N/ha, un 10 por cien menos que en el escenario base.

Los resultados de esta medida alternativa muestran una reducción del 7 por cien de las emisiones GEI y una disminución de la contaminación por nitratos de los recursos hídricos del 30 por cien. Esta medida afecta ligeramente la renta de los agricultores y el bienestar social, aunque causa un abandono importante de las actividades de regadío. Este abandono genera un aumento del excedente de estiércoles en la zona del 17 por cien.

El uso de los instrumentos económicos como impuestos sobre nitrógeno y agua de riego reduce el uso de los fertilizantes nitrogenados en las actividades de cultivo, lo que reduce las emisiones GEI hasta un 5 por cien. Estos instrumentos reducen la renta de los agricultores hasta un 36 por cien, sin mejorar el bienestar social. Además causa un abandono de las actividades de cultivo.

La restricción del uso de agua de riego es una posible alternativa de gestión de los recursos hídricos propuesta por el plan de sequía de la cuenca del Ebro. Una elevada restricción del 25 por cien del uso actual de agua reduce las actividades de cultivo hasta un 12 por cien y las emisiones GEI menos del 3 por cien con efectos positivos sobre la contaminación por nitratos de los recursos hídricos (-13%). Esta medida afecta ligeramente la renta de los agricultores (-9%) en comparación con otras medidas, pero con peores efectos sobre el bienestar social que se reduce hasta un 12 por cien.

La medida de mejora de la alimentación del ganado es una propuesta de la Directiva IPPC, y que consiste en mejorar la alimentación del porcino con la diversificación de los aportes alimentarios según fases productivas y con dietas bajas en proteína. La mejora de la alimentación del porcino reduce la excreción de nitrógeno y el contenido en nitrógeno de los estiércoles y purines, además de otros efectos sobre las emisiones de fósforo y de amoníaco. El Ministerio de Medioambiente (MARM 2010) indica que los costes de mejora de la alimentación del porcino para reducir las emisiones GEI alcanzan el 2,6 €/plaza/año, utilizando las mejores técnicas disponibles recomendadas por la Directiva IPPC. La implementación de esta medida reduce el excedente de estiércoles del 38 por cien hasta las 4.640 t N sin cambiar las elecciones óptimas de cultivo y de la ganadería, con posibles efectos positivos sobre la contaminación por nitratos de los recursos hídricos, y causa ligeras reducciones de las emisiones GEI menos del 1 por cien. Sin embargo, para poder evaluar correctamente esta medida hay que evaluar los efectos secundarios sobre las emisiones de amoníaco y fósforo. Además, esta medida

puede implementarse de forma sinérgica con otras medidas como la mejora de las instalaciones ganaderas.

En Aragón existe un problema serio de sobre-fertilización nitrogenada y de manejo no racional de los estiércoles. Las estimaciones indican que los aportes de fertilizantes minerales y orgánicos superan las necesidades de cultivo del 24 por cien, causando un excedente de nitrógeno del 42.000 t N (11 kg/ha) (MARM 2011b). Además, la disponibilidad de nitrógeno de los estiércoles podría teóricamente cubrir el 80 por cien de las necesidades de los cultivos. Esto puede contribuir a reducir el uso de los fertilizantes nitrogenados minerales, ahorrar costes, resolver los problemas de depósito de estiércoles, y reducir la contaminación. Sin embargo, los agricultores no aprovechan de las importantes disponibilidades de estiércoles por los elevados costes de transporte y aplicación de los estiércoles, las dificultades de manejo, y las incertidumbres ligadas a la producción.

Varios trabajos realizados en la cuenca del Ebro indican que el uso de los estiércoles en cantidades agrónomicamente adecuadas podría sustituir total o parcialmente a los fertilizantes minerales, obteniéndose rendimientos similares para cultivos como cebada, trigo y maíz, y reducir las pérdidas de nitrógeno. Además, se ha demostrado que los costes de transporte y aplicación de purines son más bajos que los costes de los fertilizantes minerales cuando la distancia entre la fuente de estiércoles y el sitio de aplicación es limitada (Daudén y Quilez 2004, Iguácel et al. 2010).⁵

En el área de estudio, la disponibilidad de nitrógeno de los estiércoles porcinos, de la fijación biológica, y de la materia orgánica del suelo es 14.000 t N, lo que podría cubrir las necesidades totales de nitrógeno de los cultivos iguales a 12.000 t N. Sin embargo, un aporte adicional de fertilizantes minerales es necesario para satisfacer las necesidades de cultivos de otros nutrientes. Un análisis detallado se ha realizado para determinar el balance de nitrógeno en cada comarca del área de estudio. Los resultados muestran importantes excedentes de nitrógeno en Cinca Medio y Monegros, y solo pequeñas cantidades de fertilizantes minerales es necesaria para cubrir las necesidades de potasa de cultivos. En Barbastro y Hoya de Huesca hay un déficit de nitrógeno y potasa, y es necesario aportar fertilizantes minerales (Cuadro 8).

⁵ El coste de nitrógeno orgánico es aproximadamente igual a 0,8 €/kg (Iguácel et al. 2010).

Cuadro 8. Balance de nutrientes en el área de estudio

Nutrientes	Barbastro			Cinca Medio			Hoya de Huesca			Monegros			Total área de estudio		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Necesidades cultivo (t)	2.018	1.005	2.085	1.605	953	2.537	2.757	1.328	2.783	5.680	3.251	8.025	12.009	6.535	14.429
Disponibilidad nutrientes (t)	1.845	1.518	914	2.932	2.361	1.713	1.988	1.666	1.062	7.136	5.681	3.252	13.900	11.226	6.940
Balance (t)	-173	+513	-1.171	+1327	+1408	-824	-769	+338	-1721	+1456	+2430	-4773	+1.891	+4.691	-8.489

Resultados del escenario de límites de fertilización para el área de estudio muestran que una fertilización mineral y orgánica equilibrada ajustada a las necesidades de cultivos mejora la renta de los agricultores hasta los 71 millones € (+6%) y el bienestar social aumenta hasta los 55 millones € (+12%). Las emisiones GEI y el lixiviado de nitrógeno se reducen un 10 y un 55 por cien, respectivamente. Un efecto importante de esta medida es la disminución del excedente de estiércoles del 70 por cien. Esta medida es la más preferida por los agricultores pero exige un esfuerzo por parte de los servicios de asesoramiento y de las comunidades de regantes para establecer mecanismos eficaces de control de la fertilización, y un cambio en la actual regulación medioambiental.⁶

Desde la perspectiva de adaptación de los recursos hídricos al cambio climático, la restricción del uso del agua de riego por la autoridad de cuenca reduce la actividad de regadío y permite ahorrar unos 130 hm³ de agua (-23%). Esta medida reduce la superficie de los cultivos consumidores de agua como alfalfa, arroz, y maíz, mientras se mantienen los cultivos leñosos, como recomienda el plan de sequía de la cuenca del Ebro. La reducción de la renta de los agricultores no supera el 9 por cien. Para facilitar la implementación de esta medida la administración pública debe compensar las pérdidas de los agricultores mediante ayudas directas a la renta que no supera los 6 millones €.

Otra medida para reducir el uso de agua es gravar el agua de riego mediante impuestos elevados que reflejan los costes de los servicios y de escasez de agua como recomiendan la Directiva Marco del Agua y la Comunicación de la UE sobre escasez y sequía. La eficiencia de la política de tarificación del agua es cuestionable en las regiones áridas y semiáridas con cultivos poco rentables. La demanda de agua de riego es inelástica a precios bajos por la reducida elasticidad de sustitución del agua por

⁶ La eficacia de los mecanismos de control que establece la Directiva de Nitratos es cuestionable porque el control se hace de manera aleatoria sobre explotaciones individuales y no se tiene en cuenta las mediciones de la carga contaminante total procedente del polígono de riego. Además, los límites de aportes de nitrógeno orgánico establecidos por la Directiva son excesivos para los cultivos.

otros inputs y el pequeño porcentaje de los costes de producción que supone el agua. La demanda del agua de riego se vuelve más elástica a medida que las tarifas del agua se incrementan, lo que causa una reducción moderada del uso de agua y disminución elevada de la renta de los agricultores. La implementación de este instrumento en el área de estudio permite ahorrar hasta 75 hm^3 de agua (13%), pero tiene efectos graves sobre la renta de los agricultores que se reduce hasta el 36 por cien. La única ventaja de este instrumento si es bien diseñado, es incentivar el cambio hacia las tecnologías de riego más eficientes lo que podría reducir las emisiones contaminantes y el uso de agua (Esteban et al. 2011a).

Otra política de adaptación de los recursos hídricos al cambio climático es la implementación de impuestos sobre nitrógeno, por su relación complementaria con el agua de riego en el proceso productivo. Esta medida permite ahorrar hasta 70 hm^3 de agua (12%) con mejores efectos sobre la renta de los agricultores, los daños medioambientales, y la contaminación por nitratos.

El control de la calidad de las aguas de retorno de los polígonos de riegos causa la reducción de las actividades de regadío para cumplir con los requisitos medioambientales que establece la autoridad de cuenca. Este hecho resulta en un ahorro de agua de 64 hm^3 , representando el 11 por cien del uso de agua en el escenario base.

Otra alternativa para la gestión del agua que no ha sido examinado en este trabajo es la modernización de regadíos. La introducción de nuevas tecnologías de riego modifica sustancialmente las funciones de producción, de costes y de beneficios de los cultivos, así como la productividad de los factores de producción y su nivel óptimo de utilización. Las nuevas tecnologías de riego permiten mejorar el rendimiento de los cultivos y facilitar la sustitución por cultivos más rentables, así como la producción de dos cosechas en zonas con climatología favorable (Lecina et al. 2009). El potencial de ahorro de agua que supone la modernización de regadíos es limitado. Uku (2003) ha analizado el efecto de la modernización de regadíos en la comarca de Cinco Villas, y muestra que el ahorro de agua no supera el 12 por cien. Otro estudio de Mema (2006) que analiza la modernización de regadíos a nivel del valle medio del Ebro muestra que el ahorro de agua alcanza el 11 por cien. Kahil (2011) indica que la modernización de regadíos en Aragón reduce ligeramente el uso del agua hasta un 8 por cien, por la expansión de la superficie de los cultivos intensivos que realizan los agricultores para poder pagar las inversiones. Sin embargo, a pesar de este limitado potencial de ahorro

de agua y la débil viabilidad financiera de los proyectos de modernización de regadíos, la política de modernización tiene unos efectos medioambientales considerables como la reducción de la percolación, las emisiones de lixiviado de nitrógeno y las emisiones de óxido nitroso. Además la intervención de la autoridad de cuenca y las comunidades de regantes con la reducción de las concesiones de agua a los polígonos de riego modernizados, la revisión de los derechos de uso y el control de los usos del suelo puede reducir más el uso de agua.

La evaluación de los costes de reducción de las emisiones GEI es una tarea necesaria para poder elegir entre las medidas. Según Kampas y White (2004), el coste de reducción de la contaminación es la diferencia entre la renta de los agricultores cuando no existe ninguna regulación medioambiental y la renta de los agricultores cuando se implementa regulaciones medioambientales.

Para las diferentes medidas estudiadas se ha calculado el coste de reducción de las emisiones GEI y el potencial de reducción de emisiones que proporciona cada medida (Cuadro 9). Los resultados muestran que todas las medidas estudias, excepto los límites de fertilización, generan unos costes de reducción de GEI entre 28 y 3.000 €/t CO₂eq, superiores al coste de reducción que recomienda el Programa Europeo de Cambio Climático para el sector agrario igual a 20 €/t CO₂eq (ECCP 2003).

Cuadro 9. Potencial y coste de reducción de GEI de las medidas

Escenarios	Potencial reducción GEI (t CO ₂ eq)	Coste reducción GEI (€/t CO ₂ eq)	Reducción GEI acumulada (t CO ₂ eq)
Límites de fertilización	74.000	-54	74.000
Límite emisión (10%)	72.000	28	146.000
Control calidad de agua	50.000	40	196.000
Reducción cabaña porcina (15%)	72.000	42	268.000
Impuesto nitrógeno ($t_n=0,5$ €/kg N)	33.000	273	301.000
Reducción concesiones agua (25%)	18.000	333	319.000
Impuesto nitrógeno ($t_n=1$ €/kg N)	37.000	432	356.000
Impuesto agua ($t_w=0,02$ €/m ³)	16.000	625	372.000
Impuesto emisión ($t_e=25$ €/t CO ₂ eq)	27.000	667	399.000
Impuesto agua ($t_w=0,05$ €/m ³)	21.000	1.143	420.000
Mejora alimentación ganado	1.000	3.000	421.000

Las medidas de mitigación de GEI estudiadas podrían reducir 268.000 t CO₂eq, el 37 por cien de las emisiones totales del área de estudio con un coste de reducción inferior a los 100 €/t CO₂eq. Esta misma cantidad de emisión podría reducirse con un impuesto sobre emisión superior a los 150 €/t CO₂eq. Por otra parte, los costes de reducción de GEI utilizando los instrumentos económicos como los impuestos sobre agua de riego y nitrógeno, y los impuestos sobre emisión son elevados superando los 200 €/t CO₂eq. Estos resultados muestran que los instrumentos económicos son incapaces de reducir la contaminación agrícola de manera eficiente.

La medida de mejora de la alimentación del ganado porcino tiene un elevado coste y un bajo potencial de reducción de GEI. Sin embargo, esta medida tiene otros efectos medioambientales positivos como la reducción de la contaminación atmosférica por amoníaco y de la contaminación de los recursos hídricos por nitratos y fósforo, que podrían disminuir los costes de reducción de la contaminación y favorecer su implementación práctica.

Los resultados anteriores han sido calculados utilizando una función de daño medioambiental lineal, donde el coste de las emisiones GEI es igual a 25 €/t CO₂eq, que es el precio del derecho de emisión de CO₂ en el mercado internacional. Los costes de daños medioambientales son difíciles de cuantificar y esta información es muy escasa en la literatura. Existe algunas estimaciones de los costes que varían entre 2,5 y 80 €/t CO₂eq (Tol 2004, Watkiss et al. 2005, IPCC 2007).

Para analizar el efecto de la variación del valor de daño medioambiental sobre los resultados, se ha llevado a cabo un análisis de sensibilidad con diferentes costes de daños que varían entre 10 y 70 €/t CO₂eq. Los resultados muestran que un coste bajo de 10 €/t CO₂eq no tiene efectos sobre las emisiones GEI, y tiene pocos efectos sobre el poder adquisitivo de los agricultores, pero mejora el bienestar social mediante las compensaciones que pagan los agricultores en forma de impuestos. Aumentando el coste de daño, se nota una reducción moderada de las emisiones GEI hasta el 12 por cien, con graves efectos sobre la renta de los agricultores, aunque el bienestar social sigue siendo por encima de su valor en el escenario base. Un coste de daño superior a los 40 €/t CO₂eq permite alcanzar el objetivo de reducción de GEI de la UE para los sectores difusos (-10%).

Cuadro 10. Análisis de sensibilidad con diferentes valores de daño medioambiental

Variables	Valor de daño medioambiental (€/t CO ₂ eq)				
	10	25	40	55	70
Renta (10 ⁶ €)	60	49	39	29	20
Daño medioambiental (10 ⁶ €)	7	18	26	35	44
Bienestar social (10 ⁶ €)	67	67	65	64	64
Emisiones GEI (10 ³ t CO ₂ eq)	727	700	660	640	635

7. Conclusiones

El cambio climático es una externalidad medioambiental negativa, que afecta al bienestar de la sociedad, las actividades económicas y los ecosistemas. El fuerte crecimiento de las actividades económicas y el desarrollo tecnológico en las últimas décadas han aumentado la concentración de las emisiones GEI en la atmosfera, perturbando el funcionamiento natural del sistema climático. Según el IPCC (2007), las emisiones mundiales de GEI por efecto de las actividades humanas han aumentado, desde la era preindustrial, en un 70 por cien entre 1970 y 2004. Estas emisiones antropogénicas afectan el equilibrio energético del sistema climático y causan el calentamiento de la superficie terrestre, la bajada de las precipitaciones, la subida del nivel del mar, y el aumento de la frecuencia y severidad de los fenómenos extremos.

Varios estudios científicos señalan que los impactos del cambio climático serán especialmente graves en las regiones áridas y semiáridas, con impactos sobre la producción de alimentos, y la cantidad y la calidad de los recursos hídricos.

En la Unión Europea, se han elaborado varias políticas medioambientales para mitigar las emisiones GEI y contribuir al esfuerzo internacional de mitigación establecido en el Protocolo de Kioto. Actualmente, la UE establece un objetivo de reducción de las emisiones GEI del 20 por cien en 2020.

El sector agrario es un sector clave en las políticas de cambio climático por su doble influencia en el cambio climático como sector emisor de GEI por las actividades de cultivo y la ganadería, y como sumidero que fija carbono de la atmósfera por los suelos agrícolas y la vegetación leñosa. Distintos estudios señalan que la agricultura proporciona oportunidades importantes para mitigar las emisiones GEI de manera coste-eficiente y reducir el esfuerzo en otros sectores como la industria. Sin embargo, la agricultura es un sector difuso, en el que es difícil medir las emisiones GEI y determinar los responsables de estas emisiones. Además los efectos de las políticas de mitigación

de GEI podrían dañar el sector, causar el abandono de la actividad por parte de los agricultores, y crear incentivos para actividades ilegales. El diseño de políticas de mitigación de GEI en el sector agrario es un proceso complejo, que requiere generar información biofísica y económica fiable sobre las características físicas y estructurales de las explotaciones agrarias, y sobre el manejo agronómico y las tecnologías de producción utilizadas, además requiere la cooperación de los agricultores.

En este sentido, es necesaria la intervención de la administración pública para diseñar políticas adecuadas que fomentan la cooperación de los agricultores y permiten internalizar los daños sociales que generan las actividades productivas. Por otra parte, la adaptación al cambio climático es otro reto para la sociedad para evitar los daños que podrían causar los fenómenos extremos como la sequía.

En este trabajo, se ha evaluado las emisiones GEI que generan las actividades agrarias en una zona agraria intensiva de la provincia de Huesca. Las emisiones GEI en el área de estudio alcanza las 727.000 t CO₂eq, lo que representa el 20 por cien de las emisiones GEI de origen agrario en Aragón. La intensidad de emisión es 91 €/t CO₂eq, muy por encima de la intensidad de emisión de las actividades agrarias en Aragón de 339 €/t CO₂eq. Esto pone de manifiesto que los inventarios nacionales y regionales de GEI no reflejan correctamente la situación de contaminación a nivel local. El análisis espacial de las actividades agrarias es una herramienta útil para complementar los inventarios y diseñar medidas de mitigación y adaptación al cambio climático adaptadas a las condiciones locales.

Las medidas de mitigación GEI y de adaptación de los recursos hídricos al cambio climático examinadas muestran que no hay una medida absolutamente preferida. La elección de las medidas depende de los objetivos de la autoridad pública, de la disponibilidad de información, y de los incentivos que se proporcionan a los agricultores para conseguir sus cooperaciones.

Los resultados empíricos muestran que para conseguir el objetivo de reducción de las emisiones GEI establecido por la UE para los sectores difusos (-10%), los agricultores deben asumir un coste mínimo entre -54 y 42 €/t CO₂eq. Otro resultado importante es que la cooperación de los agricultores mediante la internalización de los daños medioambientales que generan sus actividades permite mejorar el bienestar social hasta un 37 por cien, lo que justifica la intervención de las autoridades públicas. Sin embargo, la cooperación de los agricultores afecta sus rentas privadas que cae hasta un 27 por

cien. Este es un obstáculo para lograr la acción colectiva, con lo que es imprescindible diseñar incentivos para los agricultores como la transferencia de beneficios de otros sectores económicos que les cuestan más reducir sus emisiones GEI, y así apoyar al papel del sector primario como generador de servicios medioambientales y de mantenimiento de los ecosistemas.

En cuanto a las políticas de adaptación al cambio climático, es necesario cambiar el enfoque de gestión de agua en Europa que pivota entorno a los precios de agua y el coste completo de recuperación como recomienda la Directiva Marco del Agua y la Comunicación de la UE sobre escasez de agua y sequia, porque estos instrumentos económicos no pueden funcionar cuando el agua es un bien comunal con externalidades negativas como ocurre en los países áridos y semiáridos como España (Esteban y Albiac 2011b).

La gestión participativa de agua por cuenca y el aprovechamiento de los instrumentos institucionales ya existentes en España como las autoridades de cuenca y las comunidades de regantes, adaptando los usos del suelo y las necesidades hídricas a las disponibilidades de agua y la elaboración de acuerdos de reparto de agua entre los usuarios son las mejores soluciones para combatir el problema de escasez de agua y adaptarse a las sequias previstas. Los planes de sequia elaborados en algunos países de la UE muestran la importancia de planificar el uso de agua y de tener un esquema claro de actuación en situaciones de sequia.

La medida de reducción de las concesiones de agua a los polígonos de riego permite ahorrar el doble de agua que la medida de impuestos sobre el agua de riego, además los efectos sobre la renta de los agricultores son más ligeros porque los agricultores pueden adaptar los usos del suelo a las disponibilidades hídricas como eliminar los herbáceos consumidores de agua y poco rentables y mantener los leñosos muy rentables, mientras que los impuestos de agua son penalizaciones a los agricultores por utilizar el agua sin considerar los usos del suelo y las prioridades de uso, lo que crea incentivos para actividades ilegales de extracción de aguas subterráneas, un problema que ya es muy serio en España.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no se hubiera podido llevar a cabo sin la información y el apoyo de los siguientes especialistas: Javier Tapia, Eduardo Notivol, Sergio Lecina (CITA) y Fernando Orús (CTA). El trabajo se ha realizado en el marco de los proyectos GA-LC-001/2010 Gobierno de Aragón-La Caixa e INIA RTA2010-00109-C04-01.

Referencias bibliográficas

- Albiac J., E. Esteban y J. Tapia (2010): Water Scarcity and Droughts in Spain: Impacts and Policy Measures. International Drought Symposium. California. USA.
- Alcamo J., M. Flörke y M. Märker (2007): Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic change. *Hydrological Sciences Journal* 52: 247–275.
- Arnell N.W. (2004): Climate change and global water resources: SRES scenarios and socio-economic scenario. *Global Environmental Change* 14:31-52.
- Bates J., (2001): Economic evaluation of emission reductions of nitrous oxides and methane in agriculture in the EU: bottom-up analysis. In: Contribution to a Study for DG Environment, European Commission by Ecofys Energy and Environment. AEA Technology Environment and National Technical University of Athens.
- Beneke R. y R. Winterboer (1984): Programación lineal: Aplicación a la agricultura. AEDOS. Barcelona.
- Calatrava J, A Guillem y D Martínez (2011): Análisis de alternativas para la eliminación de la sobreexplotación de acuíferos en el Valle de Guadalentín. *Economía Agraria y Recursos Naturales* 11(2): 33-62.
- Cavero J., A. Beltrán y R. Aragüés (2003): Nitrate exported in drainage Waters of two sprinkler-irrigated watersheds. *Journal of Environmental Quality* 32: 916-926.
- Causapé J., D. Isidoro, D. Quilez y R. Aragües (2002): Water and nitrogen management in the irrigation district n°V of Bardenas (Zaragoza, Spain) and environmental impact on water resources. En F.J. Villalobos and L. Testi (Eds), VII Congreso de European Society For Agronomy. Córdoba.
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) (2010): Estudio del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y las masas de agua. Ficha 1: Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural. MARM. Madrid.

- Chang H., B. Evans y D. Easterling (2001): The effects of climate change on streamflow and nutrient loading. *Journal of American Water Resource Association* 37: 973-985.
- Ciscar J.C., A. Iglesias, L. Feyen, L. Szabó, D. Van Regemortera, B. Amelunge, R. Nicholls, P. Watkiss, O. B. Christensen, R. Dankers, L. Garrote, C. M. Goodess, A. Hunt, A. Moreno, J. Richards y A. Soria (2011): Physical and economic consequences of climate change in Europe. *PNAS* 108: 2678-2683. doi:10.1073/pnas.1011612108.
- Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) (2007): Plan especial de actuación en situaciones de alerta y eventual sequía en la cuenca hidrográfica del Ebro. CHE-MARM. Zaragoza.
- Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) (2008): Esquema Provisional de Temas Importantes en Materia de Gestión de las Aguas en la Demarcación Hidrográfica del Ebro. CHE-MARM. Zaragoza.
- Cornish G., B. Bosworth, C. Perry y J. Burke (2004): Water charging in irrigated agriculture: An analysis of international experience. FAO water report nº28. Roma.
- Daudén A. y D. Quilez (2004): Pig slurry versus mineral fertilization on corn yield and nitrate leaching in a Mediterranean irrigated environment. *European Journal of Agronomy* 21: 7-19.
- De Cara S., M. Houzé y P.A. Jayet (2005): Methane and nitrous oxide emissions from agriculture in the EU: A spatial assessment of sources and abatement costs. *Environmental and Resource Economics* 32: 551-583.
- Esteban E., J. Tapia, Y. Martínez y J. Albiac (2011a): Pigouvian taxation to induce technological change and abate nonpoint pollution in the Ebro Basin, Spain. *Spanish Journal of Agricultural Research* 9(4): 957-970.
- Esteban E. y J. Albiac (2011b): Groundwater and ecosystems damages: Questioning the Gisser-Sánchez effect. *Ecological Economics* 70:2062-2069.
- Estrategia Aragonesa de Cambio Climático y Energías Limpias (EACCEL) (2011): Las emisiones de Gases Efecto Invernadero en Aragón: Evolución 1990-2009. Departamento de Medioambiente. Gobierno de Aragón. Zaragoza.
- European Commission (EC) (2003): Reference Document on Best Available Techniques for Intensive Rearing of Poultry and Pigs (BREF).

- European Commission (EC) (2007a): Communication from the Commission to the European Parliament and the Council, Addressing the challenge of water scarcity and droughts in the European Union [COM(2007)414]. European Commission. Brussels.
- European Commission (EC) (2007b): Drought Management Plan Report. Including Agricultural, Drought Indicators and Climate Change Aspects. Technical Report-2008-023. Water Scarcity and Droughts Expert Network. European Commission. Office for Official Publications of the European Communities. Luxembourg.
- European Climate Change Programme (ECCP) (2003): “Can we meet our Kyoto targets?”. Second ECCP progress report. European Commission. Brussels.
- European Environmental Agency (EEA) (2005): European environment outlook. EEA Report n°4/2005. Copenhagen.
- European Environmental Agency (EEA) (2009): Water resources across Europe: confronting water scarcity and drought. EEA Report n°2/2009. Copenhagen.
- European Environmental Agency (EEA) (2010a): Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2008 and inventory report 2010. Technical Report n°6. Copenhagen.
- European Environmental Agency (EEA) (2010b): Mapping the impacts of natural hazards and technological accidents in Europe: An overview of the last decade. EEA Technical Report n°13/2010. Copenhagen.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (1995). National Mitigation Strategy: Partnerships for Building Safer Communities. Federal Emergency Management Agency. Washington DC.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2006). Livestock’s long shadow: environmental issues and options. FAO report. Roma.
- Food and Agriculture Organization (FAO) (2011): Climate change, water and food security. FAO water reports n° 36. Roma.
- Fornes J., J. A. Rodriguez, N. Hernandez y M. R. Llamas (2000). Possible solutions to avoid conflicts between water resources development and wetland conservation in the 'La Mancha Humeda' biosphere reserve (Spain). *Physics and Chemistry of the Earth* 25: 623–627.
- Freibauer A., M. Rounsevell, P. Smith y A. Verhagen (2004): Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. *Geoderma* 122: 1–23.
- Giorgi F. y P. Lionello (2008): Climate Change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change* 63:90-104.

- Gobierno de Aragón (2009a): Base de datos 1T de superficies de cultivos por término municipal para Aragón 2004-2008. Departamento de Agricultura y Alimentación. Gobierno de Aragón. Zaragoza.
- Gobierno de Aragón (2009b). Información estadística sobre ganadería por término municipal para Aragón en 2008. Departamento de Agricultura y Alimentación. Zaragoza.
- Hediger W. (2006): Modeling GHG emissions and carbon sequestration in Swiss agriculture: An integrated economic approach. International Congress Series 1293: 86–95.
- Houghton, J. (2001): The science of global warming. *Interdisciplinary Science Reviews* 26(4): 247-257.
- Iglesias A. (2009): Policy issues related to climate change in Spain. En Dinar A. y Albiac J. (Eds): *Policy and strategic behavior in water resource management*. Earthscan. London.
- Iguácel F., M.R. Yagüe, F. Orús y D. Quilez (2010): Fertilización con purín en doble cultivo anual, en mínimo laboreo, y riego por aspersión. *Informaciones Técnicas* nº223. Centro de Transferencia Agroalimentaria. Departamento de Agricultura y Alimentación. Zaragoza.
- Iguácel F. y M. Espada (2011): Resultados económicos 2005-2009 del productor porcino en Aragón. *Informaciones Técnicas* nº228. Centro de Transferencia Agroalimentaria. Departamento de Agricultura y Alimentación. Zaragoza.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (1996): Directrices del IPCC para los inventarios de gases de efecto invernadero, versión revisada en 1996: libro de trabajo. IPCC. Londres.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007): Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. IPCC. Ginebra.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2011): Summary for Policymakers of the Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (SREX). First Joint Session of Working Groups I and II. Kampala.
- Isidoro D. (1999): Balance de nitrógeno y emisión de sales en la zona regable de la Violada (Huesca). Tesis doctoral. Universidad de Lérida. Lérida.

- Kahil M.T. (2011): Instrumentos de mitigación y adaptación al cambio climático en la agricultura de Aragón. Tesis master. Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza. Zaragoza.
- Kampas A. y B. White (2004): Administrative costs and instruments choice for stochastic nonpoint source pollutants. *Environmental and Resource Economics* 27: 109-133.
- Kasterine A. y D. Vanzetti (2010): The Effectiveness, Efficiency and Equity of Market-based and Voluntary Measures to Mitigate Greenhouse Gas Emissions from the Agri-food Sector. United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD). Geneva.
- Lecina S. D. Isidoro, E. Playán y R. Aragüés (2009): Efecto de la modernización de regadíos sobre la cantidad y la calidad de las aguas: la cuenca del Ebro como caso de estudio. Monografías INIA: Serie Agrícola 26. INIA. Madrid.
- Lehner B., P. Döll, J. Alcamo, H. Henrichs y F. Kaspar (2005): Estimating the impacts of global change on food and drought risks in Europe: a continental integrated assessment. *Climatic Change* 75: 273-299.
- Martinez Y. y J. Albiac (2006): Nitrate pollution control under soil heterogeneity. *Land Use Policy* 23: 521-532.
- Martinez-Cob A., J. Faci y A. Bercero (1998): Evapotranspiración y necesidades de riego de los principales cultivos en las comarcas de Aragón. Institución Fernando el Católico. Zaragoza.
- Mema M. (2006): Las políticas de control de la contaminación difusa en el valle medio del Ebro. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza. Zaragoza.
- MacLeod M., D. Moran, V. Eory, R.M. Rees, A. Barnes, C. F.E. Topp, B. Ball, S. Hoad, E. Wall, A. McVittie, G.e Pajot, R. Matthews, P. Smith y A. Moxey (2010): Developing greenhouse gas marginal abatement cost curves for agricultural emissions from crops and soils in the UK. *Agricultural Systems* 103: 198–209.
- Millennium Ecosystem Assessment (MEA) (2005): *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press. Washington.
- Ministerio de Medio Ambiente (MIMAM). 2000. Libro blanco del agua en España. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. Secretaría de Estado de Aguas y Costas. MIMAM. Madrid.

- Ministerio de Medioambiente, Medio Rural y Marino (MARM) (2005): Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático. Proyecto ECCE – Informe Final. Oficina Española de Cambio Climático. Madrid.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM) (2009): Análisis de la economía de los sistemas de producción: Resultados técnico-económicos de explotaciones agrícolas de Aragón en 2008. Subsecretaría de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. Madrid.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM) (2010): Guía de Mejores Técnicas Disponibles del Sector Porcino. Dirección General de Recursos Agrícolas y Ganaderos. MARM. Madrid.
- Ministerio de Medioambiente, Medio Rural y Marino (MARM) (2011a): Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero de España e información adicional: 1990-2009. Secretaría de Estado de Cambio Climático. Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental. Madrid.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM) (2011b): Balance del nitrógeno en la agricultura Española 2009. Dirección General de Recursos Agrícolas y Ganaderos. MARM. Madrid.
- Morrison J., M. Quick y M. Foreman (2002): Climate change in the Fraser River watershed: flow and temperature projections. *Journal of Hydrology* 263: 230-244.
- Moran D., M. MacLeod, E. Wall, V. Eory, A. McVittie, A. Barnes, B. Rees, G. Pajot, R. Matthews, P. Smith y A. Moxey (2011): Developing carbon budgets for UK agriculture, land-use, land-use change and forestry out to 2022. *Climatic Change* 105: 529-553. doi: 10.1007/s10584-010-9898-2.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)-National Weather Service (2008). Summary of National Hazard Statistics for 2008 in the United States. NOAA. Washington DC.
- Official Journal of the European Union (OJ) (2009): The effort of Member States to reduce their greenhouse gas emissions to meet the Community's greenhouse gas emission reduction commitments up to 2020. Decision nº 406/2009/EC.
- Olesen J.E. y M. Bindi (2002): Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *European Journal of Agronomy* 16: 239–262.
- Önal H. y B. McCarl (1991): Exact aggregation in mathematical programming sector models. *Journal of Agricultural Economics* 39: 319-334.

- Orús. F. (2000): Diez años de gestión porcina. Gestión técnico-económica de explotaciones porcinas. Centro de Técnicas Agrarias. Departamento de Agricultura. Gobierno de Aragón. Zaragoza.
- Orús F. (2007): Fertilización nitrogenada, medioambiente, agricultura y sociedad (Apuntes para una visión global). VI Jornada RUENA. Pamplona.
- Ostrom E. (2002): Common-pool resources and institutions: toward a revised theory. En Gardner B. y G. Rausser (Ed): Handbook of Agricultural Economics 2. Elsevier. Amsterdam.
- Pérez Dominguez I., W. Britz y K. Holm-Müller (2004): Trading schemes for greenhouse gas emissions from European agriculture: A comparative analysis based on different implementation options. Review of Agricultural and Environmental Studies 90 (3): 287-308.
- Perman R., Y. Ma, J. McGilvray y M. Common (2003): Natural Resource and Environmental Economics. Third edition. Pearson Addison Wesley. Edinburgh.
- Pérez y Pérez L. y J. Barreiro-Hurlé (2009): Assessing the socio-economic impacts of drought in the Ebro River Basin. Spanish Journal of Agricultural Research 7(2):269-280.
- Ramos M.C., G.V. Jones y J.A. Martinez-Casanovas (2008): Structure and trends in climate parameters affecting winegrape production in northeast Spain. Climate Research 38:1-15.
- Rozakis S. y J. C. Sourie (2005): Micro-economic modelling of biofuel system in France to determine tax exemption policy under uncertainty. Energy policy 33: 171-82.
- Samper J., D. Alvares, B. Pisan y M. Garcia Vera (2007): Evaluación del Efecto del cambio climático en los recursos hídricos en la cuenca hidrográfica del Ebro con GIS-BALAN. Ponencia presentada en las Jornadas de la Zona NO Saturada del Suelo. Córdoba.
- Shortle J. y R. Horan (2001): The economics of nonpoint pollution control. Journal of Economic Surveys 15 (3): 255-289.
- Stern N. (2007): The economics of Climate Change. The Stern Review. Cambridge University Press. Cambridge.
- Tejero M. (2003): Calculo de la variabilidad temporal de las necesidades hídricas de los cultivos en las comarcas de Aragón. Proyecto de investigación fin de carrera. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria. Universidad de Lérida. Lérida.

- Tol R. (2004): The marginal damage costs of carbon dioxide emissions: An assessment of the uncertainties. *Energy Policy* 33(16):2064-2074.
- Uku S. (2003): Análisis económico y medioambiental de los sistemas de riego: una aplicación al riego de Bardenas. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza. Zaragoza.
- Varian H.R. (1998): Análisis microeconómico. Tercera edición. Antoni Bosch editor. Barcelona.
- Vermont B. y S. De Cara (2010): How costly is mitigation of non-CO₂ greenhouse gas emissions from agriculture? A meta-analysis. *Ecological Economics* 69: 1373–1386.
- Watkiss P., T. Downing, C. Handley y R. Butterfield (2005): The impacts and costs of climate change. Final report. European Commission. Londres.
- Wigley T. (1999): The science of climate change: global and U.S perspectives. Pew Center on Global Climate Change, Arlington. Virginia.
- Yang H., X. Zhang y A.J.B. Zehnder (2003): Water scarcity, pricing mechanism and institutional reform in Northern China irrigated agriculture. *Agricultural Water Management* 61. 143-161.