

J. Gallego y J.A. Gómez-Limón

EFFECTOS DE LA APLICACIÓN DE LA NUEVA PAC Y LA DIRECTIVA MARCO DE AGUAS EN EL REGADÍO. EL CASO DE LA COMARCA DE ARÉVALO-MADRIGAL (ÁVILA)

Separata ITEA

INFORMACIÓN TÉCNICA ECONÓMICA AGRARIA, VOL. **104** N.º 3 (335-359), 2008

Efectos de la aplicación de la nueva PAC y la Directiva Marco de Aguas en el regadío. El caso de la comarca de Arévalo-Madrugal (Ávila)

J. Gallego y J.A. Gómez-Limón

Departamento de Economía Agraria. E.T.S. de Ingenierías Agrarias, Universidad de Valladolid. Avenida de Madrid 57, 34071 Palencia (España). E-mail: limon@iaf.uva.es

Resumen

Este trabajo analiza las consecuencias de la aplicación conjunta de la última reforma de la Política Agraria Común y la Directiva Marco de Aguas (implementación de una tarificación del agua) sobre la agricultura de regadío. Para ello se ha considerado como caso de estudio la zona regable de la comarca de Arévalo-Madrugal (Ávila). La metodología empleada para la investigación ha sido la programación matemática positiva, a través de la cual se simula el comportamiento productivo de los regantes ante diferentes escenarios políticos. Como resultado de tales modelos se obtienen distintos indicadores económicos, sociales y ambientales que permiten cuantificar los impactos de las políticas analizadas. Estos resultados ponen de manifiesto la sensibilidad de la actividad agraria de regadío ante cambios en ambas políticas, lo que exige una coordinación entre las mismas al objeto de optimizar su implementación conjunta.

Palabras clave: Agricultura de regadío, Política agraria, Política de aguas, Programación Matemática Positiva.

Summary

Effects of the application of the new CAP and the Water Framework Directive in irrigated agriculture. The case of Arévalo-Madrugal (Ávila) county

This paper analyses the consequences of the joint implementation of the last Common Agriculture Policy reform and the Water Framework Directive (water pricing policy) in the irrigated agriculture sector. For this purpose, the irrigated area in Arévalo-Madrugal County (Ávila, Spain) has been considered as case study. The methodology used for this research has been the positive mathematical programming, employed in order to simulate the farmers' productive behaviour when facing different policy scenarios. Models built have allowed the estimation of different economic, social and environmental indicators that quantify policy impacts. Results show the sensibility of irrigated agriculture regarding both policies, circumstance that suggests that the coordination between these policies is required in order to optimize their joint implementation.

Key words: Irrigated agriculture, Agricultural policy, Water policy, Positive Mathematical Programming.

Introducción

En la actualidad España cuenta con 3,4 millones de hectáreas de regadío, superficie que representa el 14,5% de la superficie agraria útil nacional. A pesar de su limitada extensión, el regadío juega un papel estratégico dentro del complejo agroalimentario nacional, ya que aporta hasta el 50% de la producción final agrícola, dada su mayor capacidad productiva (se estima que una hectárea de regadío genera como media una renta 6 veces superior a una de secano), y es la fuente de materias primas de buena parte de la agroindustria española. Por otra parte, este subsector agrícola también desempeña una importante función en favor del desarrollo rural, como factor de creación de empleo (fijación de la población) y de equilibrio territorial (generación de actividad económica en zonas rurales desfavorecidas) (MAPA, 2001). No obstante, el éxito productivo del regadío, junto con el resto de la agricultura, ha producido igualmente efectos indeseados como son: a) la generación de excedentes en numerosos productos, b) el incremento del gasto presupuestario de la política agraria, y c) la distorsión de los mercados internacionales, con la lógica reprobación de nuestros socios comerciales. Estos inconvenientes han tratado de mitigarse a través de sucesivas reformas de la *Política Agraria Común* (PAC), que han ido alterando de forma sustancial la forma de proteger la agricultura europea (precios y subvenciones recibidos por los agricultores). La última de estas reformas se aprobó en 2003 en el Consejo Europeo de Luxemburgo, si bien no ha entrado en vigor en España hasta el año 2006.

Desde otra perspectiva cabe comentar que el regadío es el mayor consumidor de los recursos hídricos en nuestro país. Así, aportando únicamente el 2% del PIB nacional y empleando al 4% de la población activa, utiliza casi el 70% de los recursos hídricos disponibles, recursos cada vez más escasos. Además, estas actividades agrícolas constituyen la principal fuente de contaminación difusa de las masas de agua, tanto superficiales como subterráneas, como consecuencia de un uso excesivo de fertilizantes y fitosanitarios (MIMAM, 2000). Estos problemas ambientales, comunes al conjunto de países de la Unión Europea (UE), han dado lugar a la aparición de nuevas estrategias políticas a nivel europeo, recogidas en la *Directiva Marco de Aguas* (DMA). Esta norma europea exige implementar nuevos planes hidrológicos conducentes al "buen estado ecológico de las aguas" con anterioridad a 2010. Para ello, los mencionados planes deberán desarrollar un detallado programa de medidas, entre las cuales se incluye obligatoriamente la tarificación del agua. Este instrumento económico, de acuerdo con el artículo 9 de la Directiva, debe aplicarse a todos los sectores económicos de acuerdo con el principio de "quien contamina paga", suponiendo un incentivo adicional para promover el uso eficiente y sostenible de los recursos hídricos¹.

Así pues, resulta evidente que la política agraria y la hidráulica son determinantes básicos para el futuro de la agricultura de regadío, en la medida que determinan tanto los ingresos (precios de los productos agrarios y subvenciones) como los gastos (precios del agua) de esta actividad económica. En este sentido, el objetivo principal de esta

1. En cualquier caso, conviene aclarar que la propia DMA establece "los Estados miembros podrán tener en cuenta los efectos sociales, medioambientales y económicos de la recuperación, así como las condiciones geográficas y climáticas de la región o regiones afectadas". Cabe pues la posibilidad de permitir determinadas excepciones en la aplicación del principio de recuperación de costes, si bien éstas deben justificarse adecuadamente.

investigación es analizar los impactos económicos, sociales y ambientales que generará la aplicación conjunta de ambas políticas sobre el regadío. Con este propósito se ha establecido una metodología basada en la simulación del comportamiento de los regantes a través de técnicas de programación matemática, que permitirá cuantificar los impactos de ambas políticas comparando los valores futuros de diferentes indicadores con la situación vigente hasta 2006 (aplicación de la Agenda 2000 –pagos directos por superficie– y tarifación del agua nula). Este enfoque metodológico se aplica, a manera de experiencia piloto, sobre la zona regable (ZR) de la comarca de Arévalo-Madrugal (Ávila).

Establecido así el objetivo del trabajo, el desarrollo del mismo se realiza a través de 6 apartados. Tras esta sección introductoria, el segundo apartado se encarga de la descripción de la zona de estudio. En la tercera sección se describe en detalle la metodología seguida para la investigación. La formulación y alimentación de los modelos de simulación empleados es el centro de atención del cuarto apartado. Los resultados de dichos modelos se exponen de forma sintética en la quinta sección. Finalmente, el artículo concluye con las oportunas conclusiones.

Caso de estudio

La cuantificación del impacto provocado por la aplicación de la reforma de la PAC y la DMA se realiza a través de un caso de estudio relativo a un sistema agrario real, concretamente la ZR de la comarca de Arévalo-Madrugal. Esta comarca se encuentra situada en la zona sur de la cuenca hidrográfica del Duero, en la provincia de Ávila, donde se localiza un importante recurso hídrico subterráneo que se utiliza como fuente de agua; la unidad Hidrogeológica 02.17, también conocida como el acuífero

de “Los Arenales”. La superficie total ocupada por el regadío en esta ZR asciende a 13.662 ha, representando el 9,6% de la superficie agraria útil de la comarca.

La superficie de riego está dividida en 1.133 explotaciones, lo que supone una media de 12 ha de regadío por explotación. En su mayor parte la titularidad de estas explotaciones es régimen propiedad (76% de la superficie). El plan de cultivo actual (año 2007) en la zona está basado en los cereales (maíz, cebada y trigo) con el 69,3% de la superficie, los cultivos industriales (remolacha y girasol) con el 22,4%, la patata con el 2,4% y los cultivos forrajeros (alfalfa) con el 1,2%. El resto de cultivos, como leguminosas y hortalizas, resulta ser muy minoritario.

Los recursos hídricos destinados a la agricultura de regadío proceden prácticamente en su totalidad de aguas subterráneas, lo que ha producido una intensa explotación del acuífero antes mencionado. De hecho, en la actualidad el acuífero se encuentra sobreexplotado. Esta situación motivó que en el año 1998 se suspendiesen de forma cautelar el otorgamiento de nuevas concesiones de extracción en esta zona. Esta limitación continúa vigente hasta la fecha. La profundidad de bombeo es variable entre los 50 y los 150 metros, si bien la profundidad media es de 120 metros. Tal circunstancia que genera importantes costes de extracción para los regantes. Como media, el coste actual del agua en la ZR caso de estudio ronda los 0,0450 €/m³. Dado el origen subterráneo del agua, el sistema de riego predominante en la zona es el riego por aspersión, siendo utilizado para regar todos los cultivos presentes en la ZR.

Metodología

La metodología general en que se basa la presente investigación se puede sintetizar a través del esquema que aparece en la figura 1.

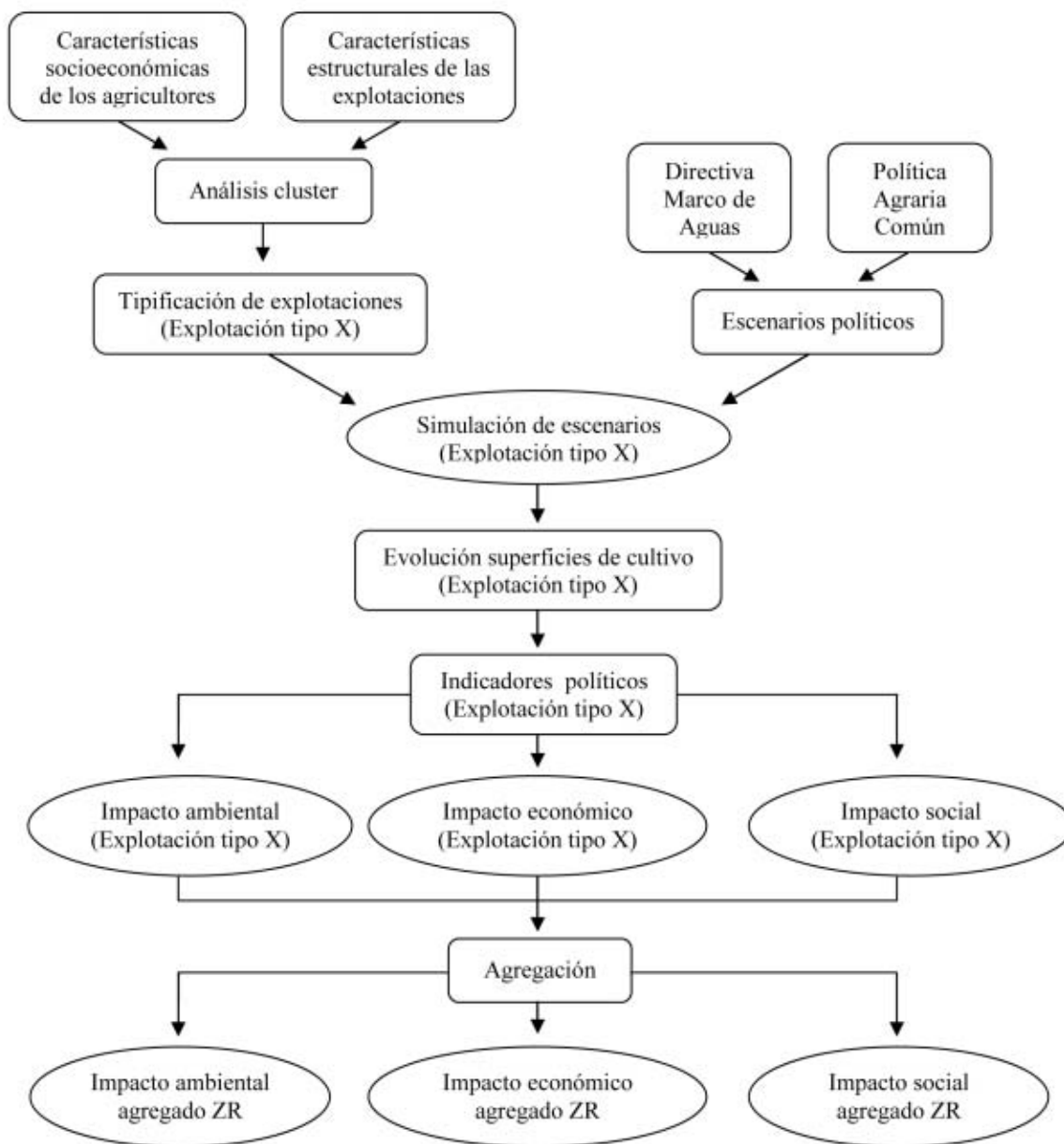


Figura 1. Esquema metodológico.
 Figure 1. Methodological chart-flow.

Siguiendo este esquema, puede comentarse que la metodología a desarrollar se divide en cinco etapas principales, tal y como se expone como a continuación.

La metodología comienza con una *primera etapa* dedicada a la construcción de los escenarios políticos que se pretenden simular, y que como antes se ha comentado, se refieren tanto a la política agraria (reforma de la PAC) como a la política de tarificación del agua (aplicación de la DMA). Dichos escenarios serán comentados con mayor detalle en los subapartados 1 y 2 de esta misma sección.

La *segunda etapa* trata de establecer los grupos de regantes existentes dentro de la zona regable en estudio, al objeto de establecer las explotaciones "tipo" que posteriormente se analizarán por separado. Estos grupos deben estar compuestos por regantes que presenten una relativa homogeneidad en cuanto a la forma de tomar sus decisiones de producción, de manera que la elaboración y resolución de los modelos de programación matemática agregados a nivel de explotaciones tipo no presenten sesgos indeseados (véase subapartado 3 de esta misma sección).

Una vez establecidos los grupos homogéneos a analizar, en una *tercera etapa* se construyen los modelos matemáticos para cada uno de ellos, de forma que éstos permitan la realización de simulaciones independientes sobre la toma de decisiones ante las potenciales tarifas del agua de riego y los distintos escenarios de política agraria (véase subapartado 4 de esta misma sección).

Una vez definidos los diferentes modelos de decisión podrá desarrollarse la *cuarta etapa* de la metodología, consistente en la realización de las correspondientes simulaciones. Así, partiendo de diferentes tarifas de agua y escenarios de la PAC, se obtendrán las decisiones productivas tomadas por los productores en las diferentes explotaciones tipo: los planes de cultivo. Como consecuencia de los planes de

cultivo así obtenidos, van a poder analizarse una serie de indicadores de tipo económico, social y medioambiental que permitan cuantificar las presiones e impactos resultantes de los instrumentos políticos aplicados (véase subapartado 5 de esta misma sección).

Finalmente, una vez obtenidos los resultados para los grupos homogéneos que componen el caso de estudio analizado, se abordará la *quinta etapa* del presente trabajo, consistente en calcular los resultados agregados para el conjunto de la ZR.

Escenarios de la PAC

Se han considerado dos escenarios relacionados con la PAC. El primero se corresponde con el escenario político anterior al actual, derivado de la aplicación de la Agenda 2000 (*PAC-2000*). El segundo escenario propuesto para el estudio es el planteado en la reforma de la PAC introducida por el Consejo Europeo de Luxemburgo (2003), y que ha entrado en vigor en España en 2006 (*PAC-2006*). Las características básicas de estos dos escenarios son las siguientes:

– *Escenario "PAC-2000"*. Se trata de la situación vigente hasta la campaña 2005/2006, donde el apoyo público al sector agrario se instrumentaba a través de unos pagos directos por superficie de 63,00 €/t de rendimiento comarcalizado para los cereales y oleaginosas. En el caso de los cultivos de proteaginosas, el pago se incrementaba hasta 72,50 €/t.

– *Escenario "PAC-2006"*. Este es el escenario político en el que se desenvuelven actualmente los agricultores, el cual se caracteriza por la desvinculación parcial de las ayudas directas recibidas anteriormente. En este escenario los productores de cultivos herbáceos reciben unas ayudas directas acopladas (relacionadas con las superficies de cultivo) equivalentes tan sólo al 25% de las ayudas

anteriores (15,75 €/t para cereales, oleaginosas y proteaginosas). El 75% restante de las anteriores ayudas han pasado a formar parte de un pago único de explotación (PUE), calculado sobre la base de las ayudas históricas recibidas individualmente por cada agricultor. Para más información puede consultarse García Álvarez-Coque (2006). Además, en este nuevo escenario se contempla igualmente lo acordado en la nueva Organización de Mercado Común (OCM) del azúcar, que sustituye el apoyo vía precios por una nueva ayuda desacoplada que se incorpora al PUE.

Al igual que en otros trabajos de investigación en los cuales se analizan los efectos de distintos escenarios políticos, como los de Alonso y Serrano (1998) o Gómez-Limón *et al.* (2002), a la hora de simular dichos escenarios a corto y medio plazo, se asume que los rendimientos de los cultivos se mantienen constantes en el tiempo. Asimismo, se asume que los precios de los productos agrarios permanecen igualmente fijos, en la medida que es previsible que estos apenas se vean afectados por la última reforma de la PAC (CE, 2007)². La única excepción es la remolacha. Para este cultivo se utilizará un precio de 48,10 €/t para el escenario PAC-2000 y de 27,63 €/t (precio mínimo remolacha + ayuda transitoria) para el escenario PAC-2006. Este último se corresponde con el precio que alcanzaría la tonelada de remolacha a partir de la campaña 2009/2010 tras la reciente reforma de la OCM para el sector azucarero.

Escenarios de tarificación del agua de riego

Tal y como se señalaba en la introducción, de acuerdo con lo establecido en la DMA, los estados miembros de la UE tienen la obligación de aplicar un gravamen económico sobre el agua de riego basado en el principio de la recuperación de costes antes de 2010, al objeto de incentivar un uso racional de los recursos hídricos. La mencionada recuperación de costes debe incluir todos los costes asociados a los servicios del agua, que incluyen los costes financieros, los ambientales y los intrínsecos al recurso (CE, 2000 y Massaruto, 2002). En este sentido cabe comentar que la ZR analizada se caracteriza por ser de iniciativa privada, en la medida que la práctica totalidad de recursos utilizados son de origen subterráneo, explotados a través de pozos particulares. Por este motivo, son los propios regantes quienes soportan íntegramente el conjunto de costes financieros (costes de operación y mantenimiento y amortizaciones)³. Caso contrario ocurre con los costes ambientales (por ejemplo, por la reducción de caudales de aguas abajo del acuífero o por la contaminación de las masas de agua) y del recurso (disminución del nivel piezométrico del acuífero que incrementa los costes de extracción de otros usuarios) derivados del uso del agua para riego, por los cuales actualmente estos mismos agricultores no pagan tarifa alguna. Así pues, según lo expuesto en la DMA, la tarificación a implementar en un

2. Sin duda esta hipótesis de este trabajo debe considerarse como una simplificación necesaria para una primera aproximación al problema. En este sentido, para futuras investigaciones se propone realizar un análisis de sensibilidad de los resultados obtenidos ante diferentes escenarios de futuro en cuanto a precios agrarios, a través de los cuales puedan estimarse los impactos de las subidas de los mismos, tal y como prevén diferentes organismos internacionales (ver OCDE-FAO, 2007).

3. Según datos oficiales (MIMAM, 2007), los costes financieros del riego con aguas subterráneas en el Duero ascienden a 0,0946 €/m³. En caso de aguas superficiales, estos costes son muy inferiores (0,0125 €/m³). La media ponderada para esta cuenca resulta de 0,0437 €/m³.

futuro debería corresponderse con estos costes actualmente no internalizados.

En cualquier caso, un estudio pormenorizado de recuperación de costes (estimación de costes ambientales y del recurso) queda fuera del alcance de la presente investigación (para más información MIMAM, 2007). A pesar de ello, la realización de las simulaciones pretendidas exige que se propongan diferentes tarifas tentativas, que pudieran hipotéticamente corresponderse con diferentes niveles de recuperación de costes para la ZR analizada. En esta línea, se establece como hipótesis de trabajo que el conjunto de costes ambientales y del recurso en la zona de estudio debe situarse en un orden de magnitud similar al de los costes financieros medios del uso de agua para riego en la cuenca del Duero, que el Ministerio de Medioambiente estima en 0,0437 €/m³ (MIMAM, 2007). Así pues, puede justificarse la propuesta de las siguientes tres tarifas⁴:

- Tarificación “suave”: 0,02 €/m³.
- Tarificación “media”: 0,04 €/m³.
- Tarificación “dura”: 0,06 €/m³.

Los problemas de la agregación y el análisis cluster

En la modelización de la actividad agraria a nivel sectorial (o a cualquier otro nivel que considere conjuntamente distintas explotaciones) surgen los problemas de los sesgos de agregación. Efectivamente, a la hora de introducir un grupo de explotaciones en un único modelo de programación matemática se tiende a sobrestimar la movilidad de los recursos, permitiendo que las explotaciones combinen recursos en proporciones no dis-

ponibles para ellas de forma individual, tal como indican Hazell y Norton (1986). Estos sesgos de agregación sólo pueden evitarse si las explotaciones agrupadas en el modelo reúnen rígidos criterios de homogeneidad, tal y como señala Day (1963): homogeneidad tecnológica, proporcionalidad pecuniaria y proporcionalidad institucional. La ZR considerada como caso de estudio ronda las 13.000 ha, todas ellas localizadas en la misma comarca agraria y con la misma fuente de agua. Por tanto, puede considerarse que se trata de una zona relativamente homogénea, desde el punto de vista edafoclimático, tecnológico, institucional y de mercado. Dadas tales características, puede asumirse que el caso de estudio considerado cumple de manera plausible las tres premisas de homogeneidad antes enunciadas.

Sobre la base de los requisitos establecidos por Day (1963) se podría pensar que el comportamiento de todos los agricultores de la zona analizada debería ser semejante, y que de esta forma se podría modelizar la zona de estudio a partir de un único modelo de simulación con unos sesgos de agregación relativamente pequeños. Sin embargo, esta supuesta homogeneidad en el comportamiento de los productores raramente se produce en la realidad considerando sólo estas condiciones; piénsese, por ejemplo, en la diversidad de planes de cultivos existentes entre los agricultores de un mismo sistema agrario. Tal circunstancia se explica porque los productores, aún disponiendo de una base de recursos similar, tratan de conseguir objetivos diferentes (Gómez-Limón *et al.*, 2004). Por este motivo, para evitar los sesgos de agregación en la modelización antes mencionados, es necesario igualmen-

4. En este sentido cabe señalar que estas mismas tarifas tentativas han sido ya utilizadas en trabajos anteriores realizados en la cuenca del Duero, como los de Gómez-Limón y Riesgo (2004) y Riesgo y Gómez-Limón (2006).

te agrupar a los regantes en grupos homogéneos en cuanto a las estrategias consideradas a la hora de proponer sus planes de cultivo. Para la obtención de estos grupos homogéneos de agricultores, la técnica más adecuada resulta ser el análisis de grupos o cluster, teniendo como patrón de clasificación el plan de cultivos seguido por los productores en la realidad, tal y como señalan Berbel y Rodríguez (1998).

Para poder desarrollar la pretendida tipificación de productores, en primer lugar se ha realizado una encuesta entre productores, a través de la cual se ha obtenido la información necesaria para la caracterización productiva de los agricultores de la ZR analizada. Empleando dicha información, el análisis cluster se ha implementado utilizando la distancia euclídea al cuadrado para medir las diferencias entre los planes de cultivo de los diferentes agricultores, considerando igualmente como criterio de agregación el método de Ward o mínima varianza.

La técnica de simulación: la Programación Matemática Positiva

La Programación Matemática Positiva (PMP) es una técnica desarrollada por Howitt (1995) que permite calibrar modelos de Programación Lineal (PL) utilizando la información contenida en el valor dual de las variables. La PMP ha sido ampliamente aceptada por los economistas agrarios para analizar escenarios relacionados con las políticas agrarias y de aguas. En este sentido cabe señalar la existencia de numerosos trabajos que han utilizado esta técnica en el territorio nacional con este propósito. Entre estos pueden citarse a Alarcón *et al.* (1997), Calatrava y Garrido (2001), Júdez *et al.* (2001), Arriaza y Gómez-Limón (2003), Blanco *et al.* (2004) y Oñate *et al.* (2007).

La técnica de la PMP asume que la actividad productiva observada en una explotación o

en un grupo de éstas es la consecuencia del comportamiento maximizador del beneficio por parte de los productores. Así, las diferencias observadas entre los distintos productores se asumen que están motivadas por los diferentes costes de producción que deben soportar los productores o por los diferentes rendimientos que estos obtienen. En la presente investigación se ha considerado *a priori* la primera de las causas indicadas como la más explicativa del dispar comportamiento entre productores. Sobre la base de este supuesto, esta técnica de programación matemática trata estimar el valor de los costes de los diferentes cultivos que permiten obtener, a través de un modelo de programación matemática, la misma distribución de cultivos que la observada en la realidad.

A continuación se realiza una exposición de los tres pasos necesarios para la construcción de los modelos de simulación con PMP:

– *Primera etapa.* Consiste en construir un modelo de PL que permita obtener los valores de las variables duales (precios sombra) para cada una de las actividades (cultivos) consideradas. El modelo de PL a construir con este propósito es el siguiente:

$$\text{Max } MBT = \sum (p_i \cdot y_i - c_i + s_i) \cdot x_i + PUE \quad [1]$$

$$\text{Sujeto a } A\bar{X} \leq \bar{B}, \quad \bar{X} \leq \bar{X}_0 \cdot (1 + \varepsilon)$$

donde *MBT* es el margen bruto total, y representa la función objetivo (supuesto de maximización del beneficio). El *MBT* se calcula como la suma de los márgenes brutos aportados por cada cultivo *i*. Por este motivo, dicha función objetivo es, lógicamente, función de las superficies dedicadas a cada cultivo (x_i), que son consideradas como las variables de decisión del modelo. Además, para el cálculo del *MBT* se requiere disponer de información cuantitativa de los siguientes coeficientes técnicos: precios (p_i), rendimientos (y_i), costes variables (c_i), ayudas directas por superficie

de la PAC acopladas a la producción (s_i) de cada uno de los cultivos considerados como alternativa y la cuantía del pago único de explotación (PUE), calculado sobre la base de las ayudas históricas recibidas individualmente por la explotación tipo considerada.

El conjunto de restricciones del modelo anterior se representa a partir de la matriz de coeficientes de necesidades de recursos (A) y el vector de recursos disponibles (\bar{B}). Además, al objeto de la posterior calibración del modelo, se incluye otro bloque de restricciones ($\bar{X} \leq \bar{X}_0 \cdot (1 + \varepsilon)$), en que \bar{X}_0 representa el vector de superficies de los cultivos observadas y ε es un pequeño número positivo que se asigna de forma arbitraria. Lógicamente, la adición de estas restricciones fuerza una solución óptima del modelo de PL que reproduce las actividades observadas en el año base (\bar{X}_0).

– *Segunda etapa.* Una vez obtenidos los valores de las variables duales, estos son utilizados para la calibración de la función de costes de los diferentes cultivos. Dicha función de costes toma la siguiente forma lineal:

$$\delta_i = \alpha_i + 0,5 \cdot \gamma_i \cdot x_i \quad [2]$$

donde α y γ son parámetros desconocidos que deben calcularse. Para poder determinar estos dos parámetros se han de resolver sendas ecuaciones. La primera ecuación a resolver permite obtener el valor del parámetro γ :

$$\gamma_i = \frac{2 \cdot \lambda_i}{x_{i0} \cdot (1 + \varepsilon)} \quad [3]$$

donde λ_i hace referencia al valor del dual de la restricción de calibración correspondiente al cultivo i ($x_i \leq x_{i0} \cdot (1 + \varepsilon)$). La segunda ecuación que se tiene que resolver permite obtener el valor del parámetro α :

$$\alpha_i = c_i - 0,5 \cdot \gamma_i \cdot [x_{i0} \cdot (1 + \varepsilon)] \quad [4]$$

– *Tercera etapa.* Una vez calculados los parámetros de las funciones de costes, estas

son utilizadas para definir la nueva función objetivo del modelo de PMP. En este último paso se transforma el modelo de PL de la primera etapa en un modelo de programación no lineal, que reproducirá la distribución de cultivos en el año base:

$$\begin{aligned} \text{Max MBT} = & \sum [(p_i \cdot y_i + s_i) \cdot x_i + \\ & + \text{PUE} - (\alpha_i + 0,5 \cdot \gamma_i \cdot x_i) \cdot x_i] \end{aligned} \quad [5]$$

Sujeto a $A\bar{X} \leq \bar{B}$

Tal y como se ha descrito, la técnica de PMP empleada para el análisis se ajusta a la descrita inicialmente por Howitt (1995), que cabe denominar como “PMP estándar” (Heckelei, 1997). No obstante, debe indicarse que este enfoque primigenio ha sido criticado por presentar algunas deficiencias (véase Heckelei y Britz, 2005 y Henry de Frahan et al., 2007), lo que ha motivado la necesidad de realizar posteriores desarrollos (Paris y Howitt, 1998; Heckelei y Britz, 2000; Júdez et al., 2001; Paris, 2001; Britz et al., 2003; Heckelei y Wolff, 2003; Röhm y Dabbert, 2003). En cualquier caso, la opción de la versión estándar de la PMP como método de simulación puede justificarse tanto por la consideración de este trabajo como una primera aproximación cuantitativa al problema analizado, como por motivos fundamentalmente pragmáticos: a) disponibilidad de información para alimentar los modelos (otros modelos más sofisticados hubiesen exigido datos de partida difíciles de obtener), y b) capacidad de transferencia de resultados (metodología fácilmente reproducible en otras zonas regables).

Indicadores socioeconómicos y ambientales

Teniendo presente el objetivo principal de este trabajo, es necesario calcular una serie de indicadores que nos permitan cuantificar el efecto que tendrían los diferentes marcos

políticos considerados. Con este propósito se han escogido los indicadores recogidos en la tabla 1. Tanto la elección de los indica-

dores como la forma de cálculo de estos está fundamentada en la metodología elaborada por la OCDE (2001).

Tabla 1. Indicadores seleccionados para el caso de estudio
Table 1. Selected indicators for the case study

Área de análisis	Indicador	Unidad de medida
<i>Impacto económico</i>	Margen bruto total (<i>MBT</i>)	€/ha
	Recaudación pública (<i>REPB</i>)	€/ha
<i>Impacto social</i>	Empleo agrario (<i>EMP</i>)	Jornales/ha
<i>Impacto ambiental</i>	Uso del agua de riego (<i>AGUA</i>)	m ³ /ha
	Balance de nitrógeno (<i>BALN</i>)	kg N/ha

Los indicadores se han calculado partiendo de coeficientes técnicos obtenidos por unidad de superficie (ha) para cada cultivo *i*. El valor finalmente obtenido de los diferentes indicadores para cada escenario resulta por tanto función del plan de cultivo óptimo en cada caso. Por ello los modelos de simulación se han construido de forma tal que, junto a las variables decisión (x_i), proporcionen igualmente el valor alcanzado por los distintos indicadores seleccionados.

A continuación se explica de forma resumida la interpretación de cada uno de estos indicadores:

– *Margen bruto de los agricultores (MBT)*. Es la diferencia entre los ingresos obtenidos como resultado de su actividad productiva (ventas y subvenciones acopladas) y los costes variables totales. El margen bruto así obtenido puede considerarse un estimador adecuado de la rentabilidad privada de la actividad para el agricultor.

– *Recaudación pública (REPB)*. Este indicador permite cuantificar el impacto que generaría la implementación de la tarifa-

ción del agua, recogiendo los ingresos por hectárea que obtendría la administración pública en concepto de las tasas aplicadas al agua de riego.

– *Empleo agrario (EMP)*. La OCDE (2001) propone el empleo agrario como un indicador contextual sobre el rol social de la agricultura, que permite la cuantificación de la contribución del sector al desarrollo rural y al equilibrio territorial (fijación de población, distribución de la renta, etc.).

– *Uso del agua de riego (AGUA)*. La cuantificación de este indicador permite medir la presión ejercida por la actividad de regadío sobre el acuífero del cual extrae los recursos hídricos.

– *Balance de nitrógeno (BALN)*. Este indicador se obtiene por diferencia entre el nitrógeno contenido en los *inputs* empleados en la producción y en los correspondientes *outputs*. Este es un indicador adecuado para poder conocer el impacto ambiental de la agricultura de regadío sobre la calidad de las aguas subterráneas.

Alimentación de los modelos

La información necesaria para la alimentación de los modelos de simulación construidos se ha recopilado de fuentes primarias y secundarias. La información secundaria se ha extraído de los Anuarios Agroalimentarios de Castilla y León (CAG, varios años). En concreto, los datos recogidos de esta fuente han sido: los precios percibidos por los agricultores y los rendimientos de los cultivos. La información primaria se ha elaborado a partir de dos encuestas. La primera de ellas ha estado dirigida a técnicos agrarios expertos de la ZR (agentes de extensión, técnicos de organizaciones agrarias, profesores universitarios e investigadores), al objeto de recabar información sobre itinerarios productivos, precios de materias primas, etc. La segunda de las encuestas ha tenido como destinatarios a los propios regantes de la zona de estudio. En total se han encuestado

a 62 agricultores, extraídos de la población objeto de estudio de forma aleatoria, tratando así que ésta muestra fuese realmente representativa. Esta segunda encuesta ha tratado de recoger información sobre la heterogeneidad de los planes de cultivo de la ZR, así como de las variables estructurales básicas de las explotaciones de regadío (superficie de la explotación, dotación de maquinaria e infraestructura de riego) y las características socio-demográficas de sus titulares.

A partir de los datos recogidos de los cuestionarios de esta segunda encuesta se ha realizado el análisis de grupos, teniendo en consideración como variables de clasificación la proporción de superficie destinada a cada cultivo dentro de la explotación. Como resultado de este análisis cluster se han obtenido 3 grupos de regantes, tal y como se presenta en la tabla 2.

Tabla 2. Características generales de las explotaciones tipo
Table 2. Main features of farm-types

Cod.	Denominación	% / nº agric.	% / sup. total	Tamaño explot. (ha)	Principales cultivos
G1	Grandes cerealistas	31,2	68,4	115	Cereales invierno, maíz y remolacha
G2	Remolacheros-cerealistas	50,0	29,5	31	Cereales invierno y remolacha
G3	Pequeños remolacheros	18,8	2,1	6	Remolacha

Cod. = código; %/nº agric. = porcentaje agricultores de la muestra; %/sup. total = porcentaje de la superficie respecto a la superficie total de los agricultores de la muestra.

Construcción del modelo de programación matemática

Se ha construido un modelo de simulación para cada uno de los grupos homogéneos de agricultores establecidos anteriormente,

al objeto de realizar las simulaciones de forma independiente, y así obtener los valores de las variables de decisión (planes de cultivo) y de los indicadores de manera individualizada para cada uno de los escenarios políticos planteados.

Variables decisión

En todos los modelos las variables de decisión empleadas han sido las superficies destinadas a cada uno de los cultivos habituales en la zona de estudio (x_i). Más concretamente, estos cultivos son: Trigo regadío (x_1), Trigo seco (x_2), Cebada regadío (x_3), Cebada seco (x_4), Maíz (x_5), Girasol regadío (x_6), Girasol seco (x_7), Remolacha (x_8), Patata (x_9), Alfalfa regadío (x_{10}), Alfalfa seco (x_{11}) y Retirada (x_{12}). Conviene comentar al respecto que se han introducido como alternativas los cultivos de secano de la zona, con el propósito de dar una mayor flexibilidad al modelo. De esta forma se considera la posibilidad que, ante los cambios producidos en la PAC y la tarificación del agua de riego, los agricultores tienen la posibilidad de pasar de cultivos de regadío a cultivos de secano.

Función objetivo

Como ya se ha comentado con anterioridad, la función objetivo se ajusta al principio de maximización del beneficio; cuantificando este como el margen bruto total (MBT). La estimación del margen bruto se ha realizado empleando la expresión [1], tal y como puede apreciarse en las tablas 3, 4 y 5, las cuales hacen referencia a los grupo de agricultores G1, G2 y G3, respectivamente.

La ecuación [5] permite simular el comportamiento de los regantes en los diferentes escenarios de la PAC propuestos. No obstante, para simular conjuntamente los escenarios de la DMA (tarificación del agua) se va a emplear la expresión siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Max MBT} = & \sum_i [(p_i \cdot y_i + s_i) \cdot x_i + PUE - \\ & - (\alpha_i + 0,5 \cdot \gamma_i \cdot x_i) \cdot x_i - (t \cdot NH_i) \cdot x_i] \end{aligned} \quad [6]$$

donde t es la tarifa del agua de riego y NH_i son las necesidades hídricas del cultivo i .

Restricciones

En la construcción de los modelos para cada uno de los grupos homogéneos de agricultores se han incluido las siguientes restricciones:

– *Utilización de la superficie total.* Se considera que la suma de la superficie de todos los cultivos es igual a 100 hectáreas. Con esta restricción se pretende que el resultado del modelo (superficie dedicada a cada cultivo) se obtenga de forma porcentual. Así, la restricción tomaría la siguiente forma:

$$\sum x_i \leq 100 \quad [7]$$

– *Sucesiones de cultivo.* Está suficientemente probado en la práctica agronómica el hecho de no respetar ciertas alternativas en los cultivos puede conducir a accidentes graves en la producción agrícola. Sin embargo, no debemos de olvidar que estas reglas dependen, no sólo de criterios técnicos, sino también de las costumbres particulares de cada zona. En este sentido el criterio seguido para la modelización de la toma de decisiones de los regantes ha sido contemplar sólo aquellas restricciones que los propios productores han declarado considerar.

– *Frecuencia de cultivos.* Este tipo de restricciones hace referencia al número de años necesario que debe darse de descanso al terreno antes de volver a sembrar de nuevo este mismo cultivo. En nuestro caso esta limitación sólo afecta a la alfalfa. Para expresar matemáticamente esta condición se utiliza la siguiente expresión:

$$x_{10} + x_{11} \leq \frac{m}{m+n} \cdot \text{Sup. util} = 0,55 \cdot 100 \quad [8]$$

donde m representa el número de años que el cultivo ocupa el terreno (5 para la alfalfa), y n es el número de años de descanso que necesita el terreno (4 para la alfalfa).

– *Cupo de remolacha.* En el cultivo de la remolacha también existen restricciones de tipo político, que determinan la máxima

Tabla 3. Variables decisión y coeficientes técnicos de los modelos. Explotación tipo G1
 Table 3. Decision variables and technical coefficients in the models. Farm-type G1

Cultivo	Variable	Rendimiento (kg/ha)	Precio (€/100kg)		Subvenciones acopladas a la producción (€/ha)		Costes variables (€/ha)	Margen bruto de los cultivos (€/ha)*	
			Escenario PAC-2000	Escenario PAC-2006	Escenario PAC-2000	Escenario PAC-2006		Escenario PAC-2000	Escenario PAC-2006
Trigo regadío	x_1	4.050	12,49	12,49	252,00	63,00	491,06	266,79	77,79
Trigo secano	x_2	2.637	12,49	12,49	157,50	39,38	345,64	141,22	23,10
Cebada regadío	x_3	3.843	11,73	11,73	252,00	63,00	472,26	230,52	41,52
Cebada secano	x_4	2.502	11,73	11,73	157,50	39,38	339,02	111,96	-6,16
Maíz	x_5	8.760	14,37	14,37	409,50	102,38	988,85	679,46	372,34
Girasol regadío	x_6	1.434	20,23	20,23	245,70	61,43	328,55	207,25	22,98
Girasol secano	x_7	630	20,23	20,23	157,50	39,38	183,13	101,82	-16,30
Remolacha	x_8	81.312	4,81	2,76	0,00	0,00	2.508,53	1.402,58	-264,32
Patata	x_9	32.884	11,25	11,25	0,00	0,00	3.262,43	437,02	437,02
Alfalfa regadío	x_{10}	13.268	12,79	12,79	0,00	0,00	1.523,71	173,27	173,27
Alfalfa secano	x_{11}	4.536	12,79	12,79	0,00	0,00	376,77	203,38	203,38
Retirada	x_{12}	0	0,00	0,00	245,70	61,43	53,65	192,05	7,78
Pago Único de Explotación								0,00	268,64**

* Este margen bruto de los cultivos se ha calculado como diferencias entre ingresos (ventas y subvenciones acopladas) y costes variables: $MBT_i = p_i \cdot y_i - c_i + s_i$. En todo caso, para el cálculo del margen bruto total de la explotación, debe considerarse el PUE, tal y como se indica en las expresiones [1] o [6].

** Valor por hectárea resultante de dividir el PUE de la explotación tipo G1 (30.893,60 €) por su superficie.

Tabla 4. Variables decisión y coeficientes técnicos de los modelos. Explotación tipo G2
 Table 4. Decision variables and technical coefficients in the models. Farm-type G2

Cultivo	Variable	Rendimiento (kg/ha)	Precio (€/100kg)		Subvenciones acopladas a la producción (€/ha)		Costes variables (€/ha)	Margen bruto de los cultivos (€/ha)*	
			Escenario PAC-2000	Escenario PAC-2006	Escenario PAC-2000	Escenario PAC-2006		Escenario PAC-2000	Escenario PAC-2006
Trigo regadío	x_1	4.050	12,49	12,49	252,00	63,00	493,01	264,84	75,84
Trigo secano	x_2	2.637	12,49	12,49	157,50	39,38	331,30	155,56	37,44
Cebada regadío	x_3	3.843	11,73	11,73	252,00	63,00	464,71	238,07	49,07
Cebada secano	x_4	2.502	11,73	11,73	157,50	39,38	324,68	126,30	8,18
Maíz	x_5	8.760	14,37	14,37	409,50	102,38	1.008,06	660,25	353,13
Girasol regadío	x_6	1.434	20,23	20,23	245,70	61,43	340,10	195,70	11,43
Girasol secano	x_7	630	20,23	20,23	157,50	39,38	186,79	98,16	-19,96
Remolacha	x_8	81.312	4,81	2,76	0,00	0,00	2.604,70	1.306,41	-360,49
Patata	x_9	32.884	11,25	11,25	0,00	0,00	3.266,54	432,91	432,91
Alfalfa regadío	x_{10}	13.268	12,79	12,79	0,00	0,00	1.541,81	155,17	155,17
Alfalfa secano	x_{11}	4.536	12,79	12,79	0,00	0,00	370,81	209,34	209,34
Retirada	x_{12}	0	0,00	0,00	245,70	61,43	59,67	186,03	1,76
Pago Único de Explotación								0,00	328,12**

* Este margen bruto de los cultivos se ha calculado como diferencias entre ingresos (ventas y subvenciones acopladas) y costes variables:
 $MBT_i = p_i \cdot y_i - c_i + s_i$. En todo caso, para el cálculo del margen bruto total de la explotación, debe considerarse el PUE, tal y como se indica
 en las expresiones [1] o [6].

** Valor por hectárea resultante de dividir el PUE de la explotación tipo G2 (10.171,72 €) por su superficie.

Tabla 5: Variables decisión y coeficientes técnicos de los modelos. Explotación tipo G3
 Table 5: Decision variables and technical coefficients in the models. Farm-type G3

Cultivo	Variable	Rendimiento (kg/ha)	Precio (€/100kg)		Subvenciones acopladas a la producción (€/ha)		Costes variables (€/ha)	Margen bruto de los cultivos (€/ha)*	
			Escenario PAC-2000	Escenario PAC-2006	Escenario PAC-2000	Escenario PAC-2006		Escenario PAC-2000	Escenario PAC-2006
Trigo regadío	x_1	4.050	12,49	12,49	252,00	63,00	505,40	252,45	63,45
Trigo secano	x_2	2.637	12,49	12,49	157,50	39,38	319,05	167,81	46,69
Cebada regadío	x_3	3.843	11,73	11,73	252,00	63,00	486,60	216,18	27,18
Cebada secano	x_4	2.502	11,73	11,73	157,50	39,38	312,44	138,54	20,42
Maíz	x_5	8.760	14,37	14,37	409,50	102,38	1.123,08	545,23	238,11
Girasol regadío	x_6	1.434	20,23	20,23	245,70	61,43	387,73	148,07	-36,20
Girasol secano	x_7	630	20,23	20,23	157,50	39,38	198,59	86,36	-31,76
Remolacha	x_8	81.312	4,81	2,76	0,00	0,00	2.703,22	1.207,89	-459,01
Patata	x_9	32.884	11,25	11,25	0,00	0,00	3.362,38	337,07	337,07
Alfalfa regadío	x_{10}	13.268	12,79	12,79	0,00	0,00	1.469,89	227,09	227,09
Alfalfa secano	x_{11}	4.536	12,79	12,79	0,00	0,00	307,69	272,46	272,46
Retirada	x_{12}	0	0,00	0,00	245,70	61,43	54,85	190,85	6,58
Pago Único de Explotación								0,00	902,92**

* Este margen bruto de los cultivos se ha calculado como diferencias entre ingresos (ventas y subvenciones acopladas) y costes variables: $MBT_i = p_i \cdot y_i - c_i + s_i$. En todo caso, para el cálculo del margen bruto total de la explotación, debe considerarse el PUE, tal y como se indica en las expresiones [1] o [6].

** Valor por hectárea resultante de dividir el PUE de la explotación tipo G2 (5.471,50 €) por su superficie.

superficie sembrada de dicho cultivo (cupos de producción). A este respecto se van a considerar distintos cupos de remolacha en función del grupo de agricultores analizado, de acuerdo a la información obtenida de la encuesta:

$$x_8 \leq \text{cupo remolacha} \quad [9]$$

– *Limitaciones de mercado.* Dentro de los modelos se consideran dos cultivos de carácter especulativo, como son la alfalfa y la patata, debido a su condición de productos percederos. Por ello se han incluido como restricciones la limitación de la superficie máxima de ambos cultivos, suponiendo así que el mercado no puede absorber una mayor cantidad de dichos productos. Dicha limitación, para cada grupo de agricultores, se ha establecido considerando la máxima superficie cultivada en las últimas campañas:

$$x_9 \leq \text{valor máximo histórico} \quad \text{y} \\ x_{10} + x_{11} \leq \text{valor máximo histórico} \quad [10]$$

Resultados

La resolución de los modelos anteriormente descritos ha permitido la obtención de resultados tanto para cada una de las tres explotaciones tipo analizadas, como para el conjunto de la ZR. Esta agregación se ha realizado sumando los resultados correspondientes a cada grupo de explotaciones debidamente ponderado por la importancia relativa que estos tienen en cuanto a la superficie agraria útil (ver tabla 6). En todo caso, al objeto de sintetizar la exposición de resultados, este epígrafe se va a centrar en el análisis de los resultados agregados a nivel de ZR, tal y como se expone en la tabla 7. No obstante, en el último subapartado de esta misma sección se presenta igualmente un resumen de los resultados obtenidos para cada uno de los grupos de agricultores considerados de forma independiente.

Uso del agua de riego

Parametrizando el precio del agua en los modelos correspondiente al escenario PAC-2006 se han calculado las correspondientes curvas de demanda de agua de riego para cada explotación tipo. Posteriormente, siguiendo el procedimiento de agregación antes comentado, se ha obtenido la curva de demanda para el conjunto de la zona regable, tal y como puede observarse en la figura 2.

Lo primero que debe destacarse para el conjunto de la ZR es que la última reforma de la PAC, por sí sola, va a tener un importante impacto sobre el uso del agua, en la medida que es de prever se produzca una disminución del consumo de un 31,2% (bajada del indicador *AGUA* de 3.331 a 2.292 m³/ha). Tal circunstancia cabe explicarla principalmente por dos motivos: a) el desacoplamiento de las ayudas, que fomenta una extensificación de la producción y el cese del riego de parte de los cereales de invierno, y b) la reforma de la OCM del azúcar, que ha provocado que la remolacha, uno de los cultivos con mayor demanda hídrica de la zona, deje de ser rentable para buena parte de los agricultores.

Si al efecto de la reforma de la PAC se añade la introducción de la tarificación del agua, el resultado en relación al indicador *AGUA* es el que se aprecia en la anterior figura. Observando la curva agregada de la ZR se aprecia la existencia de dos tramos claramente diferenciados por su pendiente. Así, para tarifas bajas del agua (de 0,00 a 0,03 €/m³), la pendiente de la curva es suave, denotando que la introducción de este instrumento económico resulta igualmente efectivo para reducir el consumo de agua (incrementos pequeños en las tarifas producen grandes ahorros de agua). Efectivamente, los regantes de la zona de estudio son altamente sensibles a la tarificación del agua, instrumento que provocaría una rápida adaptación de sus estrategias productivas, sustituyendo los cultivos de regadío

Tabla 6. Variables de decisión óptimas (planes de cultivo) en los diferentes escenarios analizados
 Table 6. Optima decision variables (crop-mixes) for the different scenarios considered

Esc.* PAC	Esc. tarifa (€/m ³)	Plan de cultivos (porcentajes sobre el total de la explotación)											
		Trigo reg.	Trigo sec.	Cebada reg.	Cebada sec.	Maiz	Girasol	Remo- lacha	Patata	Alfalfa reg.	Alfalfa sec.	Reti- rada	
Explotación tipo G1													
2000	t = 0,00	6,7	0,0	61,1	0,0	9,3	7,1	0,0	12,7	1,8	0,0	1,3	0,0
	t = 0,00	4,4	20,7	48,4	0,0	7,0	5,8	0,0	5,0	1,8	0,0	1,3	5,6
	t = 0,02	2,8	39,8	13,5	0,0	5,8	0,0	0,0	4,2	1,8	0,0	1,3	30,8
	t = 0,04	1,2	48,1	0,0	0,0	4,7	0,0	0,0	3,4	1,6	0,0	1,3	39,7
	t = 0,06	0,0	49,3	0,0	0,0	3,5	0,0	0,0	2,7	1,2	0,0	1,3	42,0
Explotación tipo G2													
2000	t = 0,00	9,7	0,0	56,0	0,0	2,3	5,7	0,0	21,4	4,0	0,0	0,9	0,0
	t = 0,00	6,3	22,3	42,0	0,0	1,2	4,8	0,0	7,2	4,0	0,0	0,9	11,3
	t = 0,02	3,8	36,7	18,2	0,0	1,0	0,0	0,0	5,9	4,0	0,0	0,9	29,5
	t = 0,04	1,3	48,3	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0	4,5	3,5	0,0	0,9	40,7
	t = 0,06	0,0	49,6	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0	3,1	2,6	0,0	0,9	43,2
Explotación tipo G3													
2000	t = 0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	6,9	0,0	0,0	93,1	0,0	0,0	0,0	0,0
	t = 0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	t = 0,02	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	t = 0,04	0,0	50,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	50,0
	t = 0,06	0,0	50,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	50,0
Total Zona Regable													
2000	t = 0,00	7,5	0,0	58,3	0,0	7,2	6,5	0,0	17,0	2,4	0,0	1,1	0,0
	t = 0,00	4,9	20,8	45,5	0,0	7,3	5,4	0,0	5,5	2,4	0,0	1,1	7,2
	t = 0,02	3,1	38,0	14,6	0,0	6,4	0,0	0,0	4,6	2,4	0,0	1,1	29,8
	t = 0,04	1,2	48,2	0,0	0,0	3,4	0,0	0,0	3,7	2,1	0,0	1,1	40,2
	t = 0,06	0,0	49,4	0,0	0,0	2,6	0,0	0,0	2,8	1,6	0,0	1,1	42,5

* Los resultados del escenario PAC-2000 sin tarificación del agua de riego se corresponde con el plan de cultivos observado en la realidad.

Tabla 7. Evolución de los indicadores socioeconómicos y ambientales para la zona regable
 Table 7. Changes in the socio-economic and environmental indicators for the irrigated area

Indicadores	PAC-2006			
	Sin tarifa (0,00 €/m ³)	Tarifa suave (0,02 €/m ³)	Tarifa media (0,04 €/m ³)	Tarifa dura (0,06 €/m ³)
AGUA				
Escenario base = 3.331 m ³ /ha	-31,2%	-61,6%	-79,5%	-85,3%
MBT				
Escenario base = 450 €/ha	-11,4%	-19,3%	-23,3%	-25,9%
REPB				
Escenario base = 0,00 €/ha	0,00 €/ha	26,53 €/ha	26,50 €/ha	28,38 €/ha
EMP				
Escenario base = 1,90 Jorn./ha	-17,5%	-40,4%	-52,3%	-55,4%
BALN				
Escenario base = 27,4 kg N/ha	-32,3%	-46,4%	-57,7%	-63,0%

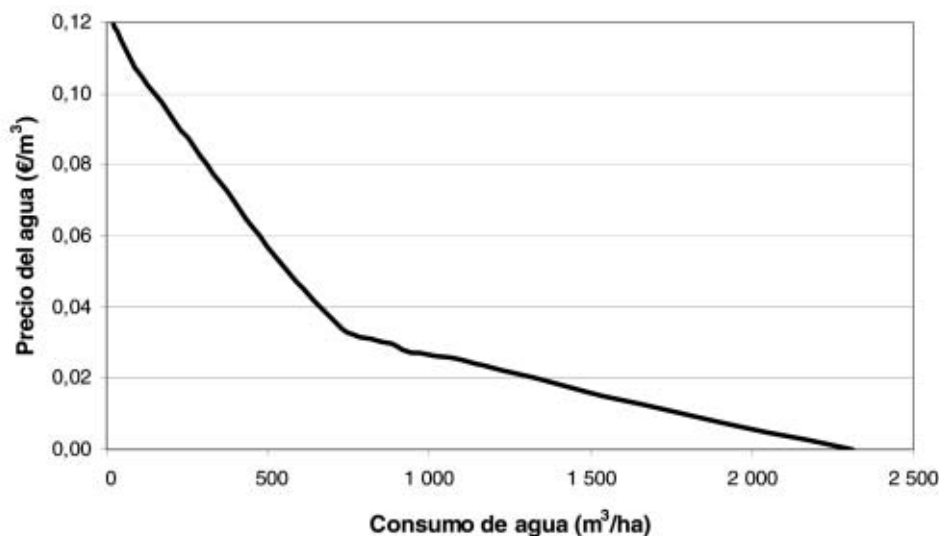


Figura 2. Curva de demanda de agua para el escenario PAC-2006.
 Figure 2. Water demand curve for PAC-2006 scenario.

con menor valor del producto marginal del agua (cereales de invierno y girasol) en favor de los cultivos de secano más habituales en la zona (fundamentalmente cereales de invierno). Dentro de este tramo está comprendida la tarifa "suave" (0,02 €/m³), que produciría una disminución del 61,6% del indicador *AGUA* respecto al escenario base.

Tras este tramo inicial de elevada elasticidad, para tarifas superiores a 0,03 €/m³, se evidencia una curva con una mayor pendiente, que reflejaría una conducta por parte de los agricultores más reticente a la introducción de nuevos cambios en sus planes de cultivos. Así, la sustitución de los cultivos de regadío con mayor valor añadido (patata, maíz o alfalfa)

por otros de secano se realiza más lentamente, hasta llegar a una tarifa de 0,12 €/m³, a partir de la cual dejaría de regarse. Dentro de este tramo, se localizarían las tarifas "media" (0,04 €/m³) y "dura" (0,06 €/m³), que producirían ahorros adicionales de agua respecto al *status quo* del 79,5% y 85,3%, respectivamente.

De los resultados obtenidos en los modelos, podemos concluir que tanto la última reforma de la PAC como la implementación de la DMA tendrán un efecto positivo sobre el uso del agua de riego, produciendo importantes ahorros de agua de riego, evitando asimismo la sobre-explotación del acuífero del que se nutre la ZR.

Impacto económico

La puesta en funcionamiento tanto de la nueva PAC como de la entrada en funcionamiento de la tarificación del agua (aplicación de la DMA) provocará un efecto negativo sobre la rentabilidad privada del agricultor. Así, según se puede observar en la tabla 7, la aplicación de la nueva PAC (PAC-2006), por sí sola, provocará que el indicador *MBT* disminuya un 11,4% respecto al escenario base (PAC-2000). La puesta en marcha de la tarificación del agua de riego va agravar este efecto negativo sobre la rentabilidad del regadío de la zona. Así, cabe señalar cómo las tarifas analizadas provocarán disminuciones adicionales en el indicador del *MBT*, que van desde el 19,3% para la tarifa "suave" hasta el 25,9% para la tarifa "dura". Esta disminución en la rentabilidad estaría producida tanto por los pagos de los regantes a la administración en concepto de tasas (transferencia de rentas del sector privado al público), como por los cambios de los planes de cultivos antes comentados (menores ingresos procedentes del mercado por la sustitución de los cultivos de regadío por otros de secano, de menor valor añadido).

Estos resultados ponen de manifiesto la incidencia negativa de la tarificación sobre la sos-

tenibilidad financiera de la agricultura de regadío en la zona, pudiendo acarrear un peligro cierto de abandono de la actividad por parte de las explotaciones menos competitivas. En cualquier caso conviene apuntar igualmente que el impacto negativo que podría generar este instrumento económico es considerablemente menor que el que produciría en el caso de mantenerse las ayudas directas por superficie como en el escenario PAC-2000. Esto se debe a que la sustitución parcial de tales pagos directos por el nuevo pago único (escenario PAC-2006) provoca una menor sensibilidad de los ingresos de los regantes ante cambios en los planes de cultivos experimentados como respuesta a la introducción de la tarificación.

Finalmente, respecto al impacto económico, hay que analizar igualmente la incidencia de la tarificación del agua sobre la recaudación pública (indicador *REPB*). Tal y como se puede observar en la tabla 7, las cantidades cobradas por la administración responsable resultan ser relativamente homogéneas para las 3 tarifas consideradas, oscilando entre 26,50 y 28,38 €/ha. Efectivamente, como nos enseña la Teoría económica, la curva de ingresos públicos en estas circunstancias tiene forma de U invertida; creciente en un primer tramo para tarifas bajas, alcanzado la máxima recaudación para un determinado rango de tarifas, y decreciente hasta anularse para tarifas mayores. En el caso de estudio analizado se evidencia que las tarifas consideradas se corresponderían con las que produce las mayores recaudaciones posibles. De hecho, tarifas inferiores 0,03 €/m³ y superiores a 0,06 €/m³ producirían recaudaciones sensiblemente menores.

Impacto social

La implementación de la reforma de la PAC-2006 y de la DMA va a tener un efecto social negativo para el conjunto de la zona regable.

Así, el cambio en la política agraria, por sí misma, inducirá una pérdida de empleo directo en el regadío del 17,5%. Esta disminución en la demanda de trabajo se debe, como antes se comentó, a la sustitución de los cereales de invierno y la remolacha de regadío por otros cultivos de secano, menos intensivos en el uso de este factor productivo. En un futuro, la aplicación de la tarificación del agua provocará pérdidas adicionales de empleo, derivadas de la progresiva desafección del regadío y, por tanto, del abandono de cultivos más intensivos en mano de obra. En este sentido cabe señalar que las pérdidas inducidas por este instrumento económico oscilarán entre el 40,4% para el caso de la tarifa "suave" y el 55,4% para la tarifa "dura".

Asimismo, cabe señalar igualmente que el impacto social de estos cambios trasciende del sector agrícola, en la medida que es predecible un impacto también negativo sobre el empleo indirecto asociado al regadío (agroindustrias, empresas de insumos...), en la medida que los escenarios analizados provocarán una extensificación de la actividad productiva. Así pues, teniendo en cuenta el importante papel social del regadío como factor de fijación de la población, cabe concluir que la nueva PAC y la tarificación afectarán de forma negativa al desarrollo rural de la zona analizada.

Impacto ambiental

Los cambios de cultivos inducidos por la última reforma de la PAC (cereales de invierno y remolacha en regadío por cultivos de secano) afectarán igualmente al balance de nitrógeno del conjunto del regadío analizado. Así, en comparación con el escenario base, este cambio en la forma de proteger a la agricultura tienen efectos ambientales positivos, disminuyendo en un 32,3% la cantidad de nitrógeno liberado al medioambiente (disminución de la contaminación difusa de las masas de agua).

La posterior aplicación de la tarificación intensificará este tipo de mejora ambiental, disminuyendo los aportes de esta sustancia fertilizante a los ecosistemas hasta en un 63,0% en el caso de la tarifa "dura". Tal circunstancia está motivada igualmente por el abandono progresivo de los cultivos en regadío a favor de los cultivos en secano, menos exigentes en fertilizantes nitrogenados.

Impacto diferencial de la PAC y la DMA

Una vez realizado el análisis de resultados para el conjunto de la ZR, a continuación se analizan de forma sintética los resultados desagregados por grupos homogéneos de regantes:

– *G1 "Grandes cerealistas"*. Los resultados obtenidos para este primer grupo de agricultores pueden observarse en la tabla 8. El cambio en la PAC por sí sólo produciría una disminución en el uso del agua de riego del 28,3%. No obstante, este ahorro de agua se incrementaría con la implementación de la tarificación, reduciéndose su uso hasta el 83,3% con la aplicación de una tarificación "dura". También se aprecia una disminución del indicador *MBT*, tanto por el cambio de la PAC como por la posterior entrada en vigor de la DMA, reduciéndose este indicador entre el 11,7% (considerando sólo la nueva PAC) y el 26,9% (considerando además una tarificación "dura" del agua). La recaudación pública más elevada es de 30,62 €/ha, que se alcanzaría para la aplicación de la tarifa "dura". El indicador *EMP* disminuye un 16,4% con la entrada en funcionamiento de la PAC-2006, si bien este impacto social negativo se agravaría con la implementación de las tarifas del agua, con una disminución de la mano de obra superior al 50% para las tarifas "media" y "dura". Por último, el indicador *BALN* se reduce con la puesta en marcha de la PAC, efecto positivo que se ve incrementado con la posterior implementación de

Tabla 8: Evolución de los indicadores socioeconómicos y ambientales. Explotación tipo G1
 Table 8: Changes in the socio-economic and environmental indicators. Farm-type G1

Indicadores	PAC-2006			
	Sin tarifa (0,00 €/m ³)	Tarifa suave (0,02 €/m ³)	Tarifa media (0,04 €/m ³)	Tarifa dura (0,06 €/m ³)
AGUA				
Escenario base = 3.178 m ³ /ha	-28,3%	-62,5%	-77,9%	-83,3%
MBT				
Escenario base = 417 €/ha	-11,7%	-19,9%	-24,0%	-26,9%
REPB				
Escenario base = 0,00 €/ha	0,00 €/ha	23,83 €/ha	28,01 €/ha	30,62 €/ha
EMP				
Escenario base = 1,84 Jorn./ha	-16,4%	-42,0%	-52,6%	-55,7%
BALN				
Escenario base = 24,2 kg N/ha	-27,9%	-44,1%	-54,9%	-60,0%

la DMA, disminuyéndose sensiblemente la cantidad de nitrógeno liberada al ambiente.

– G2 “Remolacheros-cerealistas”. Los resultados obtenidos de los modelos de simulación para este segundo grupo de agricultores puede verse con detalle en la tabla 9. El último cambio en la PAC produciría por sí sólo un ahorro significativo del consumo de agua (40,2%), dada la importante sustitución de la

superficie destinada a la remolacha por cereales de invierno, cultivos mucho menos demandantes de este recurso. En todo caso, el valor de este indicador AGUA disminuye con mayor intensidad con la entrada en funcionamiento de la DMA. Tanto el cambio de la PAC como la puesta en marcha de la DMA provocan igualmente un impacto negativo sobre el indicador MBT, que disminuye entre el 11,6% (sólo

Tabla 9: Evolución de los indicadores socioeconómicos y ambientales. Explotación tipo G2
 Table 9: Changes in the socio-economic and environmental indicators. Farm-type G2

Indicadores	PAC-2006			
	Sin tarifa (0,00 €/m ³)	Tarifa suave (0,02 €/m ³)	Tarifa media (0,04 €/m ³)	Tarifa dura (0,06 €/m ³)
AGUA				
Escenario base = 3.410 m ³ /ha	-40,2%	-64,0%	-81,7%	-87,5%
MBT				
Escenario base = 477 €/ha	-11,6%	-18,3%	-22,0%	-24,2%
REPB				
Escenario base = 0,00 €/ha	0,00 €/ha	24,56 €/ha	24,90 €/ha	25,12 €/ha
EMP				
Escenario base = 1,96 Jorn./ha	-20,2%	-38,2%	-50,8%	-53,8%
BALN				
Escenario base = 30,8 kg N/ha	-40,1%	-50,3%	-61,8%	-67,6%

PAC-2006) y el 24,2% (PAC-2006 y tarificación "dura") con respecto a la situación actual. El indicador *REPB* alcanza su valor más elevado con la aplicación de la tarifa "dura" (25,12 €/ha). La demanda de mano de obra también disminuye para el escenario PAC-2006 (20,2%), efecto que se ve acrecentado con la tarificación (disminución hasta un 53,8% para una tarifa "dura"). Finalmente, en cuanto al balance de nitrógeno, cabe comentar que la nueva PAC por sí misma reduce el indicador *BALN* en un 40,1%, mientras que la implementación de la DMA consigue reducir este indicador hasta el 67,6%.

– *G3 "Pequeños remolacheros"*. En la tabla 10 se muestran los resultados obtenidos para el tercer grupo de agricultores. Para este grupo de regantes la nueva PAC o la aplicación de una tarificación "suave" apenas generan un cambio en la demanda de agua, ya que la reorientación productiva motivada por estas dos políticas se basa en la sustitución de remolacha por maíz, cultivos ambos con semejantes necesidades hídricas. No obstante, para tarifas superiores (tarifas "media" y "dura"), sí se experimenta una disminución del indicador *AGUA*. En cuanto al indicador *MBT*, cabe señalar que las dos

políticas analizadas producen descensos menores que para las explotaciones tipo anteriores. Así, la aplicación de la nueva PAC disminuiría este indicador en tan sólo el 1,6%, mientras que la aplicación de la DMA provocaría un descenso de hasta casi el 20% para los escenarios tarifa "media" y "dura". El indicador *REPB* alcanza un valor máximo de 142,50 €/ha para un nivel de tarificación "suave". La demanda de empleo se reduciría un 17,3% con el cambio en la PAC, descenso que se agravaría con la aplicación de tarifas "media" y "dura", con las cuales el indicador *EMP* se vería reducido hasta el 65,4% con respecto a la situación actual. Finalmente, la cantidad de nitrógeno liberada al ambiente se reducirá de forma significativa (64,5%-93,2%), tanto con la aplicación de la PAC como con la aplicación de la DMA.

De los resultados anteriores se constata la heterogeneidad en la respuesta de estas unidades de producción representativas ante los distintos escenarios analizados. Tal circunstancia evidencia la necesidad de realizar una modelización individualizada por explotaciones tipo y su posterior agregación al objeto de obtener resultados globales (minimización del sesgo de agregación).

Tabla 10: Evolución de los indicadores socioeconómicos y ambientales. Explotación tipo G3
Table 10: Changes in the socio-economic and environmental indicators. Farm-type G3

Indicadores	PAC-2006			
	Sin tarifa (0,00 €/m ³)	Tarifa suave (0,02 €/m ³)	Tarifa media (0,04 €/m ³)	Tarifa dura (0,06 €/m ³)
<i>AGUA</i>				
Escenario base = 7.125 m ³ /ha	-0,0%	-0,0%	-100,0%	-100,0%
<i>MBT</i>				
Escenario base = 1.159 €/ha	-1,6%	-13,9%	-19,5%	-19,5%
<i>REPB</i>				
Escenario base = 0,00 €/ha	0,00 €/ha	142,50 €/ha	0,00 €/ha	0,00 €/ha
<i>EMP</i>				
Escenario base = 2,73 J/ha	-17,3%	-17,3%	-65,4%	-65,4%
<i>BALN</i>				
Escenario base = 83,4 kg N/ha	-64,5%	-64,5%	-93,2%	-93,2%

Conclusiones

A la vista de los resultados anteriores, cabe concluir afirmando que tanto la reforma de la PAC como la tarificación del agua producen impactos en la misma dirección. Efectivamente, tal y como evidencian los resultados de la simulación, la aplicación de ambas políticas producen efectos negativos sobre la rentabilidad privada de los agricultores y la demanda de mano de obra, a la vez que generan efectos positivos sobre la demanda de agua de riego y el balance de nitrógeno liberado al ambiente. Lógicamente, la implementación conjunta de ambas políticas intensificará la magnitud de tales impactos. Así pues, como conclusión se puede afirmar que la implementación de estas dos políticas mejorará la sostenibilidad ambiental del regadío, pero empeorará su sostenibilidad económica y social.

Desde una perspectiva estrictamente técnica no puede valorarse estos cambios en términos de deseabilidad o bienestar social, en la medida que tan sólo la sociedad en su conjunto o sus representantes políticos están legitimados para hacerlo. En todo caso, de estos resultados pueden deducirse una serie de recomendaciones para la toma de decisiones en relación a la gestión pública de la agricultura de regadío. Así, en primer lugar cabría señalar la necesidad de una coordinación entre las políticas agrarias y de aguas, definiendo unos objetivos comunes y proponiendo medidas complementarias tendentes a alcanzar soluciones compromiso entre los diferentes criterios políticos en conflicto (económicos, sociales y medioambientales), con el propósito último de mejorar la "gobernanza" de estos sistemas agrícolas particulares. Así, se trataría de alcanzar, a través de un único enfoque, los objetivos ambientales propuestos (conservación de recursos hídricos y minimización de la contaminación) sin que esto repercuta de una forma excesivamente negativa sobre la supervivencia de la actividad agraria de regadío,

poniendo así en peligro la consecución de objetivos económicos y sociales en relación a las rentas de los agricultores y la fijación de población en el territorio (desarrollo rural).

La segunda de las recomendaciones que se pueden derivar de este trabajo sería la necesidad de realizar nuevas investigaciones en este sentido, que analicen los impactos de la aplicación conjunta de otros instrumentos relacionados con la gestión de los recursos hídricos en la agricultura. Algunos de ellos ya han sido aplicados en nuestro país, como son los mercados de agua y la modernización de regadío. Asimismo, cabría la posibilidad de analizar otros instrumentos más novedosos, entre los que se encuentran la implementación de programas agroambientales específicos para el regadío o la de una eco-tasa por la utilización de los fertilizantes nitrogenados. En este sentido, sería conveniente estudiar cuál de estas medidas o qué conjunto de ellas permiten fomentar un uso más racional de los recursos hídricos, y ello sin menoscabar la potencialidad de desarrollo socioeconómico de las zonas donde el regadío se localiza.

En esta misma línea, un aspecto igualmente de interés para próximas investigaciones sería la profundización en el análisis de la sostenibilidad de los sistemas de riego. En este sentido, este trabajo debe considerarse un primer avance, con el estudio de las diferentes dimensiones de la sostenibilidad a través de una reducida batería de indicadores económicos (MBT y REPB), sociales (EMP) y medioambientales (AGUA y BALN). En cualquier caso, en un futuro sería necesario ampliar de forma realista el número de indicadores a estimar a través de los modelos y el cálculo de indicadores sintéticos de sostenibilidad, que permitan orientar sobre la implementación de las diferentes políticas al objeto de optimizar la sostenibilidad global de este tipo de sistemas agrarios.

Agradecimientos

Los autores agradecen sinceramente los comentarios realizados por los revisores anónimos del trabajo, en la medida que han contribuido a la mejora científica del mismo. Esta investigación ha sido cofinanciada por el Ministerio de Educación y Ciencia (MEC-FEDER) por medio del proyecto FUTURPAC (AGL2006-05587-C04-01/AGR).

Bibliografía

- Alarcón S, Sebastián RA, Serrano A, 1997. Modelización de explotaciones agrarias mediante programación matemática. Una aplicación en la comarca de Arévalo-Madrigal (Ávila). Investigación Agraria Serie Economía 12: 299-320.
- Alonso R, Serrano A, 1998. Evaluación de los efectos de la reforma de la PAC de 1992 y de la Agenda 2000 sobre las explotaciones agrícolas en la comarca de Arévalo-Madrigal. Revista Española de Estudios Agrosociales y Pesqueros 184: 9-36.
- Arriaza M, Gómez-Limón JA, 2003. Comparative performance of selected mathematical programming models. *Agricultural Systems* 77: 155-171.
- Berbel J, Rodríguez A, 1998. An MCDM approach to production analysis. An application to irrigated farms in Southern Spain. *European Journal of Operational Research* 107: 108-118.
- Blanco M, Iglesias E, Sumpsi JM, 2004. Environmental and socioeconomic effects of water pricing policies: Key issues in the implementation of the Water Framework Directive. 13th Annual Conference European Association of Environmental Resource Economics, 25-28 de junio, Budapest.
- Britz W, Heckeleei T, Wolff H, 2003. Symmetric Positive Equilibrium Problem: A Framework for rationalizing Economic Behavior with Limited Information: Comment. *American Journal of Agricultural Economics* 85(4): 1078-1081.
- CAG (Consejería de Agricultura y Ganadería), varios años. Anuario Agroalimentarios de Castilla y León. Consejería de Agricultura y Ganadería-Junta de Castilla y León, Valladolid.
- Calatrava J, Garrido A, 2001. Análisis del efecto de los mercados de agua sobre el beneficio de las explotaciones, la contaminación por nitratos y el empleo eventual agrario. *Economía Agraria y Recursos Naturales* 2: 149-169.
- CE (Comisión Europea), 2000. Política de tarificación y uso sostenible de los recursos hídricos. Documento COM (2000) 477 final.
- CE (Comisión Europea), 2007. Prospects for agricultural markets and income in the European Union 2006–2013. Directorate General for Agriculture and Rural Development-European Commission, Bruselas.
- Day RH, 1963. On aggregating linear programming models of production. *Journal of Farm Economics* 45: 797-813.
- García Álvarez-Coque JM (ed.), 2006. La Reforma de la Política Agraria Común. Eumedia-MAPA, Madrid.
- Gómez-Limón JA, Arriaza M, Berbel J, 2002. Conflicting implementation of agricultural and water policies in irrigated areas in the EU. *Journal of Agricultural Economics* 53: 259-281.
- Gómez-Limón JA, Riesgo L, Arriaza M, 2004. Multi-Criteria analysis of input use in agriculture. *Journal of Agricultural Economics* 55: 541-564.
- Gómez-Limón JA, Riesgo L, 2004. Irrigation water pricing: differential impacts on irrigated farms. *Agricultural Economics* 31: 47-66.
- Hazell PBR, Norton RD, 1986. Mathematical programming for economic analysis in agriculture. MacMillan Publishing Company, New York.
- Heckeleei T, 1997. Positive Mathematical Programming: review of the standard approach. CAPRI Working paper 97-03, Institute of Agricultural Policy, University of Bonn.
- Heckeleei T, Britz W, 2000. Positive Mathematical Programming with multiple data points: a cross-sectional estimation procedure. *Cahiers d'Economie et Sociologie Rurales* 57: 28-50.

- Heckelei T, Britz, W, 2005. Models based on positive mathematical programming: state of the art and further extensions. En Arfini F, (ed.) Modelling agricultural policies: State of the art and new challenges. Monte Università Parma, Parma: 48-74.
- Heckelei T, Wolff H, 2003. Estimation of constrained optimisation models for agricultural supply analysis based on generalised Maximum Entropy. *European Review of Agricultural Economics*, 30(1): 27-50.
- Henry de Frahan B, Buysse J, Polomé P, Fernagut B, Harmignie O, Lauwers L, van Huylenbroeck G, Van Meensel J, 2007. Positive mathematical programming for agricultural and environmental policy analysis: Review and practice. En Weintraub A, Romero C, Bjorndal T, Epstein R, (eds.) *Handbook on Operations Research in Natural Resources*. Springer, New York: 129-154.
- Howitt RE, 1995. Positive Mathematical Programming. *American Journal of Agricultural Economics* 77: 329-342.
- Judéz L, Chaya C, Martínez S, González A, 2001. Effects of the measures envisaged in "Agenda 2000" on arable crop producers and beef and veal producers: an application of Positive Mathematical Programming to representative farms of a Spanish region. *Agricultural Systems* 67: 121-138.
- MAPA (Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación), 2001. Plan Nacional de Regadíos. MAPA, Madrid.
- Massaruto A, 2002. The full-cost recovery of irrigation: rationale, methodology, European experience. *International Conference on Irrigation Water Policies: Micro and Macro Considerations*. World Bank-FAO-International Water and Resource Economics Consortium (IWREC), 24-27 de junio, Agadir (Marruecos).
- MIMAM (Ministerio de Medio Ambiente), 2000. Libro blanco del agua. MIMAM, Madrid.
- MIMAM (Ministerio de Medio Ambiente), 2007. Precios y costes de los servicios de agua en España. MIMAM, Madrid.
- OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico), 2001. Environmental indicators for agriculture. Volume 3. Methods and results. OCDE, París.
- OCDE-FAO (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico-Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), 2007. OECD-FAO Agricultural Outlook 2007-2016. OCDE-FAO, París
- Oñate JJ, Atance I, Bardají I, Lluvia D, 2007. Modelling the effects of alternative CAP policies for the Spanish high-nature value cereal-steppe farming systems. *Agricultural Systems* 94: 247-260.
- Paris Q, 2001. Symmetric Positive Equilibrium Problem: A framework for rationalizing economic behavior with limited information. *American Journal of Agricultural Economics* 83(4): 1049-1061.
- Paris Q, Howitt RE, 1998. An analysis of ill-posed production problems using Maximum Entropy. *American Journal of Agricultural Economics* 80(1): 124-138.
- Riesgo L, Gómez-Limón JA, 2006. Multi-criteria policy scenario for public regulation of irrigated agriculture. *Agricultural Systems* 91: 1-28.
- Röhm, O, Dabbert S, 2003. Integrating Agri-Environmental Programs into Regional Production Models: An extension of positive mathematical programming. *American Journal of Agricultural Economics* 85(1): 254-265.
- (Aceptado para publicación el 24 de enero de 2008)