

Simulación multicriterio de mercados de agua de regadío: el caso de la cuenca del Duero (*)

YOLANDA MARTÍNEZ MARTÍNEZ (**)

JOSÉ A. GÓMEZ-LIMÓN RODRÍGUEZ (***)

1. OBJETIVOS

Buena parte de España se encuentra ya en una situación de «economía madura del agua» (Randall, 1981), caracterizada por una demanda alta y creciente de agua, una oferta inelástica del recurso a largo plazo, un elevado gasto presupuestario para el mantenimiento de las infraestructuras hidráulicas, una intensa competencia por el agua entre los distintos usos, un grave problema de externalidades negativas derivadas del uso inadecuado del agua y un alto coste social derivado de las subvenciones crecientes al uso del recurso. Para afrontar esta problemática de escasez de agua socialmente condicionada, como ha ocurrido en otros países en semejantes circunstancias, ha sido necesaria la aplicación de nuevas orientaciones en la gestión del recurso, abandonando las tradicionales políticas basadas exclusivamente en el incremento de la oferta. En este nuevo contexto se han comenzado a desarrollar políticas de demanda más acordes con las necesidades actuales, que incentivan la conservación del agua y la reasignación de la misma hacia los usos de mayor valor (Thobani, 1997). Este cambio en la orientación política de la gestión del agua se ha realizado básicamente a través de tres tipos de instrumentos económicos,

(*) Esta investigación ha sido financiada por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología por medio del proyecto LEYA (REN2000-1079-C02-02) y por la Consejería de Educación y Cultura de la Junta de Castilla y León a través del proyecto MODERNA (UVA037/02). Asimismo, los autores agradecen sinceramente los valiosos comentarios de los revisores, que han permitido una mejora cualitativa del documento finalmente publicado.

(**) Dpto. de Análisis Económico. Facultad de CC. Económicas y Empresariales. Universidad de Zaragoza.

(***) Dpto. de Economía Agraria. ETSIIAA. Universidad de Valladolid. Palencia.

como son: las ayudas a la mejora de las infraestructuras hidráulicas (mejora de su eficiencia técnica), la tarificación y los mercados de agua. Este trabajo se centra en el último de los anteriores instrumentos.

La introducción de los mercados de agua se ha planteado tradicionalmente como una medida para mejorar, de una forma descentralizada, la asignación del agua entre sus potenciales usuarios y reducir los efectos de la escasez. Así, las bondades que justifican la introducción de mercados de agua se han fundamentado en que a través de esta figura institucional se puede reasignar el agua entre los diferentes usos hacia aquellos de mayor valor, al tiempo que se incentiva un uso más racional del recurso en cada uno de los empleos, paliando de esta forma las ineficiencias que han demostrado hasta la fecha las medidas administrativas utilizadas para gestionar los recursos hídricos (Randall, 1981; Spulber y Sabbaghi, 1994; Easter y Hearne, 1995; Thobani, 1997; Lee y Jouravlev, 1998 y Howe y Goemans, 2001). Según la literatura, con el mercado se puede conseguir la eficiencia asignativa del recurso mejor que con cualquiera de sus alternativas, mejorando el bienestar conjunto de la sociedad (Vaux y Howitt, 1984; Howe, *et al.*, 1986; Rosengrant y Binswanger, 1994; Easter y Hearne, 1995).

No obstante, convendría comenzar el estudio de los mercados de agua conceptualizando los mismos correctamente. Así, estos deben considerarse como «todo marco institucional en virtud del cual los titulares de derechos sobre el agua están autorizados, respetando unas reglas establecidas al respecto, a cederlos voluntariamente a otro usuario a cambio de una compensación económica» (Sumpsi *et al.*, 1998, p. 73). En virtud de esta definición, debe apuntarse que los mercados que se pueden desarrollar en el mundo real no son homogéneos, sino que pueden presentar múltiples formas de organización. Efectivamente, la implantación de mercados de agua, desde el punto de vista de la política económica permite determinar una serie de variables que definen sus características básicas, permitiendo con ello que puedan afrontarse de forma específica las peculiaridades de la gestión del agua de las distintas zonas donde se aplican (Lee y Jouralev, 1998).

Este trabajo se centra exclusivamente en el mercado de agua concreto que se ha introducido recientemente en España a través en la reforma de la Ley de Aguas de 1999 (1). En concreto, de entre los

(1) Esta novedad legislativa fue introducida por la Ley 46/1999, de 13 de diciembre, de modificación de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas (BOE 14-XII-1999), y más concretamente en el artículo 61 bis de la misma. No obstante, conviene indicar que actualmente la normativa aplicable es en realidad el Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas (BOE 24-VII-2001), y por el Real Decreto 606/2003, de 23 de mayo, por el que se modifica el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico (BOE 6-VI-2003).

diferentes sistemas alternativos de transferencias de derechos de uso del agua, la legislación española ha optado por limitar las transacciones al arrendamiento (compra-venta de agua y no de los derechos), mercados que se conocen como mercados *spot*.

Con todo ello, el objetivo del presente trabajo es la simulación de un mercado *spot* de agua de riego para una cuenca hidrográfica. Para ello se desarrolla una metodología multicriterio basada en el diferente comportamiento que tienen los agricultores con respecto a la toma de decisiones productivas en sus explotaciones (planes de cultivo) y, por tanto, en el uso de insumos agrarios, entre los que destaca el agua. Con este novedoso enfoque se propone un modelo de programación matemática que simule el equilibrio del mercado para diferentes escenarios de dotación de agua, costes de transacción y tarifa de agua, cuantificando para cada caso, de forma concreta, los beneficios económicos (incrementos de eficiencia) y sociales (impacto sobre el empleo agrario) que generaría la aplicación efectiva del mercado de agua recogido por la legislación española. Este planteamiento se pone en práctica, como caso de estudio, en el Valle del Duero, situado al norte de España.

Para lograr este objetivo, tras esta introducción, en el segundo apartado se expone el marco teórico en que se apoya el modelo de programación matemática multicriterio que servirá para la realización de las distintas simulaciones, mientras que en el tercero se presenta la zona de estudio donde se aplica la metodología planteada (cuenca del Duero). En la cuarta sección se describen de forma resumida los resultados más relevantes. El trabajo termina con la exposición de las oportunas conclusiones.

2. METODOLOGÍA

La literatura cuenta con numerosos trabajos empíricos sobre la modelización de impactos económicos, sociales y ambientales de los mercados de agua. Para el caso particular de los mercados *spot*, como referencias más significativas pueden citarse las de Houston y Whittlesey (1986) en el estado de Idaho (USA), Dinar y Letey (1991) y Weinberg *et al.* (1993), ambas en el californiano valle de San Joaquín, Horbulyk y Lo (1998) en estado canadiense de Alberta, y Bjornlund y Mckay (1998) en el australiano estado de Victoria. La mayoría de ellos apuntan como principal resultado la ganancia de eficiencia económica por la implantación de este instrumento de asignación descentralizada de recursos hídricos.

En el ámbito español, merece la pena destacar los trabajos de Garrido (2000) y Calatrava y Garrido (2001). Estos autores aplican un modelo matemático basado en la programación matemática positiva para la simulación de mercados en el valle medio del Guadalquivir. También en esta línea conviene mencionar el trabajo de Arriaza *et al.* (2002), que a través de un modelo no lineal simulan el funcionamiento de un mercado local de agua en la misma cuenca hidrográfica. Como elemento más novedoso, este último trabajo considera un comportamiento de los regantes según los principios de la Teoría de la Utilidad Esperada (EUT), maximizando una función de utilidad cuyo único atributo es el beneficio. Estos tres estudios concluyen afirmando que la aplicación de este tipo de política de demanda supondría mejoras moderadas en la eficiencia en el uso del recurso en la cuenca analizada.

Si bien todos los estudios antes comentados deben considerarse precursores del presente trabajo, la mayor aportación de la investigación aquí presentada es metodológica, desarrollando como novedad una modelización de estos mercados de agua a través de técnicas de programación multicriterio. Efectivamente, la totalidad de los estudios anteriores plantean modelos matemáticos que asumen un comportamiento de los productores agrarios basado en la maximización del beneficio (o una función de utilidad donde el beneficio es el único atributo), siguiendo una hipótesis clásica de la Teoría Económica (o de la EUT). Así, los agricultores emplearían o no (venden) el agua en función de la *productividad* (valor marginal del agua) que ésta genera en sus explotaciones, según la base edafoclimática con la que cuentan. Nuestro planteamiento, por el contrario, trata de representar una generalización del anterior enfoque, planteando como punto de partida que el uso del agua depende básicamente de cómo ésta contribuye a alcanzar el conjunto de objetivos considerados por los productores. Así, en el presente estudio se supone que el consumo o no (venta) del agua por los regantes se realiza en función de la *utilidad multiatributo* que este factor productivo les aporta, considerando para ello la importancia relativa que estos agricultores asignan a cada uno de los diferentes objetivos que pretenden optimizar simultáneamente (Gómez-Limón *et al.*, 2003).

2.1. La Teoría de la Utilidad Multiatributo (MAUT)

Existen ya numerosos estudios que demuestran cómo los productores agrarios no se ajustan por completo al principio de maximización de funciones de utilidad de un único atributo (el beneficio o la

riqueza), medible exclusivamente en unidades monetarias, tal como propone la EUT, como extensión de la Teoría Económica clásica. Efectivamente, distintos autores han puesto de manifiesto a través de estudios empíricos la complejidad de la toma de decisiones de los agricultores, para la cual se evalúan distintos criterios. Entre estos trabajos, podemos señalar los clásicos de Gasson (1973), Smith y Capstick (1976), Harper y Eastman (1980), Kliebenstein *et al.* (1980) y Patrick y Blake (1980). Más recientemente también pueden citarse las investigaciones realizadas por Costa y Rehman (1999), Willock *et al.* (1999) o Solano *et al.* (2001). Todos estos estudios tienen como conclusión común la constatación de que los agricultores a la hora de tomar sus decisiones de producción tienen en mente, además de la esperanza del beneficio y sus distintos momentos, otra serie de consideraciones relacionadas con su entorno económico, social, cultural y ambiental. En este contexto, el empresario tomará sus decisiones de forma que se intenten satisfacer, en la medida de lo posible, todos estos criterios de forma simultánea. Considerando, por tanto, la existencia de objetivos múltiples en el proceso de decisión de los agricultores, ha parecido adecuado enfocar la simulación de los mercados del agua dentro del paradigma de la Teoría de la Decisión Multicriterio. En esta línea, se ha optado por calcular las funciones de utilidad multiatributo de los distintos agentes que pueden operar en el hipotético mercado como herramienta válida para el análisis.

La Teoría de la Utilidad Multiatributo (MAUT) tiene por objeto reducir los problemas de decisión en contexto multicriterio a través de una función de utilidad cardinal, expresión matemática capaz de ordenar las alternativas de acuerdo con un criterio único (valor alcanzado por la función de utilidad). Sin embargo, este enfoque tan atractivo cuenta como mayor inconveniente la estimación de tales funciones de utilidad, que requieren una intensa intervención con los decisores.

Normalmente, en contexto multiatributo, se ha optado por calcular funciones de utilidad aditivas. La valoración de las distintas alternativas (función de utilidad) en este caso resulta de sumar las contribuciones de cada uno de los atributos considerados adecuadamente ponderados en función de su importancia. Como los diferentes atributos están medidos en diferentes unidades, se requiere la normalización correspondiente. Matemáticamente resultaría:

$$U = \sum_{j=1}^n w_j k_j r_j \quad [1]$$

donde U es el valor de la utilidad que es una función de n atributos ($j=1, \dots, n$), w_j es la ponderación o peso otorgado al atributo j , k_j es el factor normalizador del atributo j y r_j es el valor del atributo j .

Keeney (1974), Keeney y Raiffa (1976) y Fishburn (1982) exponen los requerimientos matemáticos necesarios para suponer una función de utilidad aditiva. Sin duda, estos requerimientos matemáticos necesarios para suponer una función de utilidad multiatributo (MAUF) aditiva pueden llegar a ser realmente restrictivos, ya que raramente acaecen en el mundo real. A pesar de ello, Edwards (1977), Farmer (1987) y Huirne y Hardaker (1998) han demostrado que las funciones de utilidad aditivas permiten una aproximación sumamente cercana a la función de utilidad verdadera, incluso cuando las condiciones referidas no son satisfechas. Por estos motivos, en el ámbito agrario normalmente se ha optado por calcular funciones de utilidad aditivas. Este estudio ha optado por seguir esta misma línea, y basar su análisis en MAUF aditivas.

Teniendo en cuenta estas consideraciones de partida, la metodología seguida en el presente estudio puede sintetizarse en los siguientes puntos.

2.2. Definición de agentes «tipo» que operan en el mercado

Dada la imposibilidad práctica de simular un mercado de agua considerando como agentes intervinientes en el mismo a todos los regantes a título individual, se hace necesaria una agregación de los productores considerados en grupos homogéneos, que incluyan sujetos con un mismo comportamiento en relación con el uso del agua. Este trabajo parte de la idea básica de que el comportamiento de los agricultores viene delimitado tanto por sus potencialidades productivas (derivadas de las condiciones estructurales de sus explotaciones) como de la importancia relativa que éstos le dan a los diferentes objetivos de gestión planteados, y que quedan condensados en sus correspondientes MAUF (Gómez-Limón *et al.*, 2003). Por ello, los grupos homogéneos que constituyen los agentes «tipo» en la modelización del mercado para una cuenca hidrográfica que se han establecido son el resultado de una tipología de doble entrada, en la que se consideran como variables clasificatorias de los agentes intervinientes las condiciones estructurales de las correspondientes explotaciones y las diferentes ponderaciones de objetivos que consideran los productores. En los dos siguientes apartados se explica la forma en que se han definido los distintos agentes como resultado del binomio explotación-productor.

2.2.1. *Diversidad estructural de las explotaciones agrícolas*

En la modelización de la actividad agraria a cualquier nivel diferente de la simple explotación (consideración conjunta de distintas explotaciones) se presentan problemas de sesgos de agregación. Efectivamente, la introducción de un conjunto de explotaciones en un modelo de programación único sobrestima la movilidad de los recursos, permitiendo que las explotaciones combinen recursos en proporciones no disponibles para ellas de forma individual (Hazell y Norton, 1986, p. 145). El resultado final en todos los casos son resultados de la función objetivo sesgados al alza y, por tanto, valores de las variables de decisión inalcanzables en la realidad. Estos sesgos de agregación sólo pueden evitarse si las explotaciones agrupadas en el modelo reúnen rígidos criterios de homogeneidad (Day, 1963): homogeneidad tecnológica, proporcionalidad pecuniaria y proporcionalidad institucional.

Para este trabajo, que trata de abordar una cuenca hidrográfica entera, la unidad geográfica básica de análisis es la zona regable (Comunidad de Regantes). Se trata de zonas relativamente pequeñas (entre 1.000 y 15.000 ha normalmente) comprendidas dentro de un perímetro bastante homogéneo desde el punto de vista edafo-climático. Así, dentro de cada una de estas unidades de riego se permiten los mismos cultivos, presentando éstos rendimientos semejantes en toda su extensión. Además, ha de tenerse en cuenta que se trata de una agricultura que presenta unos niveles de mecanización y tecnificación similares en todas las explotaciones. Con estas condiciones puede suponerse que se cumplen básicamente los requerimientos de homogeneidad tecnológica y proporcionalidad pecuniaria antes mencionados.

Las restricciones a incluir en la modelización de la agricultura de esta zona, habida cuenta de la existencia de un mercado eficiente de capitales y de mano de obra, se limitan básicamente a las exigencias agronómicas (sucesión y frecuencia de los cultivos) y a las impuestas por la Política Agraria Común (obligación de retirada de tierras y cuota de producción de remolacha), que son igualmente semejantes para todas las explotaciones de la zona. En estas circunstancias también puede considerarse proporcionalidad institucional.

Según lo expuesto hasta el momento, se podría pensar que la toma de decisiones en cada una de las zonas regables incluidas en el estudio podrían modelizarse a través de un único programa lineal con unos sesgos de agregación relativamente pequeños. Sin embargo, conviene señalar que los requerimientos antes expuestos están plan-

teados desde una óptica clásica, asumiendo una función objetivo basada sólo en el beneficio como único criterio de elección (i.e., proporcionalidad pecuniaria). Si se plantea este análisis desde una perspectiva multicriterio, surge entonces la necesidad de definir otra homogeneidad adicional como requerimiento para evitar los sesgos de agregación: la homogeneidad relativa a los criterios de elección de los agricultores.

2.2.2. *Diversidad de objetivos de los productores*

La experiencia acumulada al respecto hace suponer que la homogeneidad en los criterios de decisión entre los productores raramente se da en la realidad. Efectivamente, al ser los criterios de decisión y sus ponderaciones relativas unas variables basadas principalmente en características psicológicas, se trata de variables que cambian significativamente de unos productores a otros, incluso en zonas donde se verifican el resto de condiciones de homogeneidad antes aludidas. Así pues, según esta perspectiva, las diferencias en la toma de decisiones (planes de cultivo) entre agricultores de una misma zona de producción (p.e. una zona regable) hay que buscarlas principalmente en la configuración de sus respectivas funciones objetivo (en las cuales se condensan las ponderaciones que otorgan a los distintos criterios), más que en otras diferencias relativas a los beneficios por actividad o a la dispar exigencia y disposición de recursos (Gómez-Limón *et al.*, 2003).

En este sentido, para evitar los sesgos de agregación inherentes a la modelización conjunta de productores con funciones objetivos significativamente diferentes, se requiere una clasificación de los mismos en grupos homogéneos en función de su forma de tomar las decisiones. Para ello nos basamos en el trabajo de Berbel y Rodríguez (1998), quienes apuntan que la forma más eficiente para realizar este tipo de clasificación es la utilización de la técnica cluster, tomando como criterio de clasificación el vector de toma de decisiones real de los productores (plan de cultivo actual), que puede considerarse un *proxy* adecuado de la forma de su función de utilidad multiatributo o, lo que es lo mismo, en cuanto a la importancia relativa que conceden a los diferentes objetivos de gestión (forma de tomar decisiones).

De forma más concreta la técnica cluster utilizada en la presente investigación para la clasificación de los agricultores ha empleado la distancia *chi-cuadrado* para medir las diferencias entre los vectores de variables de decisión (superficie dedicada a cada cultivo) de los dife-

rentes productores. Asimismo, el criterio de agregación utilizado ha sido el *método de Ward* o de mínima varianza.

De esta forma, aplicando la técnica cluster descrita a cada zona regable, se han podido obtener finalmente los casos representativos o agentes «tipo» para la modelización del mercado. Así, puede considerarse que cada uno de estos grupos, como resultante del binomio potencialidad productiva (zona regable) –forma funcional de la MAUF de agricultores (cluster)–, tienen la suficiente homogeneidad interna en cuanto al uso del factor agua y su intervención en el mercado de agua como para poder ser considerados como los agentes «tipo» adecuados para realizar la pretendida simulación.

2.3. Cálculo de la función de utilidad multiatributo

La metodología seguida en el presente estudio para la estimación de las correspondientes MAUF lineales y aditiva se basa en la técnica desarrollada por Sumpsi *et al.* (1997). Esta metodología tiene como mayor ventaja que no requiere interacción con los productores, por lo que la función de utilidad se establece fijándose únicamente en el plan de cultivo actual elegido por los mismos. Esta técnica se desarrolla en concreto a través de los siguientes pasos:

1. Se define matemáticamente cada atributo j (f_j) como una función del vector de decisiones \vec{X} (área dedicada a cada cultivo de la zona de estudio); $f_j = f_j(\vec{X})$. Estos atributos se proponen de forma apriorística como posibles objetivos tenidos en cuenta por los productores a la hora de tomar sus decisiones de cultivo.

Para nuestro estudio, como objetivos capaces de explicar el comportamiento de los agricultores, se proponen:

- a) La *maximización del Margen Bruto Total (MBT)*, como indicador del beneficio en el corto plazo. Así, para cada cultivo se ha calculado la media de los márgenes brutos de las campañas de los años considerados (1993-1999), expresados en euros constantes de 2000 (MB_c). Por tanto, la expresión del MBT en cada grupo homogéneo de agricultores es la suma de los márgenes correspondientes de cada uno de los cultivos, tal y como aparece en la siguiente expresión:

$$MBT = \sum_c MB_c X_c \quad [2]$$

donde c se refiere a cada uno de los cultivos de la zona.

- b) La *minimización del riesgo*, cuantificado en este caso como el valor de la varianza total (*VAR*). En la construcción de nuestro

modelo, dicho riesgo se estimará a través de la matriz de varianzas-covarianzas del margen bruto durante el período considerado, $[cov]$. Matemáticamente, para cada uno de los clusters, su expresión será:

$$VAR = \vec{X}_c^t [cov] \vec{X}_c \quad [3]$$

- c) La *minimización de la Mano de Obra Total (MOT)*, como indicador complementario del ocio disponible por el agricultor, que estos pretenden maximizar. Además, la mano de obra también puede interpretarse como un índice de la complejidad de gestión del cultivo, y que, por tanto, los regantes tratan igualmente de minimizar. La expresión de la mano de obra del conjunto de la explotación se obtendría de la siguiente forma:

$$MOT = \sum_c MO_c X_c \quad [4]$$

siendo MO_c la mano de obra (en Unidad de Trabajo Agrícola -UTA-) demandada por cada cultivo (X_c).

2. Se obtiene la matriz de pagos optimizando sucesivamente los diferentes objetivos planteados. Los elementos f_{ij} componentes de esta matriz se refieren al valor del objetivo i cuando el objetivo j es optimizado.

Para la generación de la matriz de pagos, las restricciones particulares que se consideran en los diferentes modelos (un modelo por agente «tipo» o binomio zona regable-cluster) son las siguientes:

- a) Utilización de una superficie igual al total disponible por la explotación tipo.
- b) Limitaciones de mano de obra, tanto familiar como de trabajadores contratados eventualmente durante la campaña.
- c) Restricciones de agua, en función de su disponibilidad.
- d) Limitaciones de cultivo impuestas por la PAC (retirada de superficie y el cupo de remolacha).
- e) Frecuencia de los cultivos según los criterios de los propios productores.
- f) Limitaciones de mercado para cultivos especulativos (aplicable únicamente para los cultivos de la alfalfa y la patata) y limitaciones tradicionales.

Cada una de estas restricciones se ha construido diferencialmente para cada agente «tipo», en función de la información disponible de cada uno de ellos.

3. Se resuelve el sistema de $n+1$ ecuaciones siguientes:

$$\sum_{j=1}^n w_j f_{ij} = f_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad \text{y} \quad \sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad [5]$$

donde n es el número de objetivos considerados, w_j son las ponderaciones de los distintos objetivos (las incógnitas), f_{ij} son los elementos de la matriz de pagos y f_i los valores de los objetivos en la realidad, calculados en función de la distribución de cultivos actual.

4. Si, como normalmente ocurre, el anterior sistema no tiene solución real positiva, es decir, no ofrece como resultado un conjunto de w_j (pesos de cada objetivo), se resuelve el siguiente programa lineal donde se minimiza la suma de las variables de desviación (n_i y p_i):

$$\begin{aligned} & \text{Min} \sum_{i=1}^n \frac{n_i + p_i}{f_i} \quad \text{sujeto a:} \\ & \sum_{j=1}^n w_j f_{ij} + n_i - p_i = f_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad \text{y} \quad \sum_{j=1}^n w_j = 1 \end{aligned} \quad [6]$$

Los pesos obtenidos en la etapa 4 son consistentes con la siguiente expresión de función de utilidad separable, aditiva y lineal para cada atributo (Dyer, 1977):

$$U = \sum_{j=1}^n w_j k_j f_j(\vec{X}) \quad [7]$$

donde k_j es un factor normalizador.

Para que este subrogado de la utilidad cumpla las condiciones exigibles a las MAUF aditivas, ésta debe valorar las diferentes alternativas en un rango de 0 a 1. De igual forma, las funciones lineales monoatributo que la componen deben tener este mismo rango de variación. Por ello se plantea la siguiente MAUF equivalente expresión a la [8]:

$$U = \sum_{j=1}^n w_j \frac{f_j(\vec{X}) - f_{j*}}{f_j^* - f_{j*}} \quad [8]$$

Con ello, la expresión [5] se modifica tomando como factores normalizadores k_j las inversas de las diferencias entre los valores ideales (f_j^*) y los antiideales (f_{j*}) de los distintos objetivos, y eligiendo como forma lineal de las funciones $f_j(\vec{X})$ de los diferentes atributos los valores de los propios atributos $f_j(\vec{X})$ menos los correspondientes valores anti-ideales (f_{j*}).

Debe señalarse que nuestro objetivo fundamental aplicando esta metodología multicriterio se puede resumir como sigue: dado un conjunto de objetivos definidos *a priori* como los más importantes para los agricultores de la zona en estudio, se quiere definir el peso relativo de cada uno de ellos, de manera que se explique el comportamiento real de cada grupo homogéneo de productores agrarios. Lo que se persigue con ello no es otra cosa que calcular una función de utilidad subrogada para cada cluster considerado, representativas del comportamiento de los productores que conforma cada uno de estos grupos. Dichas funciones de utilidad serán las que nos permitan realizar posteriormente la simulación, dado que serán las funciones objetivo que pretenderán maximizar cada agente «tipo» (cluster) en los diferentes escenarios posibles (p.e. diferentes dotaciones efectivas de agua).

2.4. Simulación de un mercado de agua de riego para el conjunto de una cuenca hidrográfica

De lo comentado hasta el momento se desprende que el problema de la toma de decisiones a corto plazo (decisión sobre el plan de cultivos) al que se enfrenta todo regante individual puede simularse a través de un modelo de programación matemática cuya función objetivo sea la función multiatributo que se obtenga para su correspondiente vector de ponderaciones (w_j), sujeto a las diferentes restricciones de tipo técnico e institucional existentes. Así, comenzando para el caso en que no exista posibilidad de realizar intercambios de agua (ausencia de mercado), el problema quedaría planteado como sigue:

$$\text{Max } U(\vec{X}) = w_{\text{MBT}} K_{\text{MBT}} \text{MBT}(\vec{X}) - w_{\text{VAR}} K_{\text{VAR}} \text{VAR}(\vec{X}) - \quad [9]$$

$$w_{\text{MOT}} K_{\text{MOT}} \text{MOT}(\vec{X})$$

$$\text{s.a.: } \sum_c X_c \leq S \quad [9.a]$$

$$\sum_c NH_c X_c \leq D S \quad [9.b]$$

$$A\vec{X} \leq \vec{B} \quad [9.c]$$

$$X_c \geq 0 \quad \forall c \quad [9.d]$$

donde w_{MBT} , w_{VAR} y w_{MOT} son las ponderaciones de los diferentes objetivos considerados por el productor, k_{MBT} , k_{VAR} y k_{MOT} son los correspondientes factores normalizadores, X_c es la superficie dedicada al cultivo c (en ha), S la superficie total disponible por el agricultor (en ha), NH_c las necesidades hídricas del cultivo c (en m^3/ha) y D en la dotación total de agua disponible (en m^3/ha).

Así, en este modelo básico quedan reseñadas explícitamente las restricciones relativas a la superficie disponible [9.a] y a la disponibilidad de agua [9.b]. La restricción genérica [9.c] se refiere al resto de restricciones antes señaladas (limitaciones de la PAC –retirada y cupo de remolacha–, frecuencia y rotación de cultivos y limitaciones de mercado) para construcción de las matrices de pagos.

Si a este mismo productor individual se le permite intercambiar agua a través de un mercado tipo *spot*, el modelo de optimización al que se enfrentaría quedaría como sigue:

$$\text{Max } U(\vec{X}) = \quad [10]$$

$$= w_{\text{MBT}} K_{\text{MBT}} \left\{ \text{MBT}(\vec{X}) + \sum_j \left[\left(P_m - \frac{CC_{ij}}{2} \right) V_{ij} \right] - \sum_j \left[\left(P_m + \frac{CC_{ji}}{2} \right) C_{ij} \right] \right\}$$

$$- w_{\text{VAR}} K_{\text{VAR}} \text{VAR}(\vec{X}) - w_{\text{MOT}} K_{\text{MOT}} \text{MOT}(\vec{X}) \quad [10.a]$$

$$\text{s.a.: } \sum_c X_c \leq S \quad [10.b]$$

$$\sum_c N H_c X_c + \sum_j V_{ij} - \sum_j C_{ij} \leq D \cdot S \quad [10.c]$$

$$A\vec{X} \leq \vec{B}$$

$$X_{ci} \geq 0; P_m \geq 0; V_{ij} \geq 0; C_{ij} \geq 0 \quad \forall c \forall i \forall j \quad [10.d]$$

donde P_m es el precio de mercado (en €/m³), CC_{ij} son los costes de transacción que suponen la transferencia del propio regante (i) al otro regante (j), medidos igualmente en €/m³, V_{ij} son las cantidades de agua vendidas de i a j (en m³) y C_{ij} son las cantidades compradas de i a j (en m³).

En este sentido conviene apuntar que los costes de transacción son parámetros establecidos en función del origen y el destino de las transferencias. Por este motivo, CC_{ij} no tiene por qué equivaler a CC_{ji} . De forma concreta, para nuestro modelo se ha considerado un valor mínimo (equivalente a 0,005 €/m³) cuando se trata de transacciones intracomunitarias (dentro de una zona regable) de agua, un valor de 0,01 €/m³ cuando se trata de transferencias que se realicen intercomunitarias (ente zonas regables) empleando los propios cauces naturales (aguas a bajo) como vía de transporte, y un valor máximo tendente a infinito (de forma operativa se ha tomado 10 €/m³) para el resto de casos, en los cuales no existe infraestructura de transporte alguna, impidiendo físicamente las transferencias. Para todas las transacciones se ha supuesto que estos costes son soportados a partes iguales por comprador y vendedor.

Como puede observarse, el modelo [10], con respecto al modelo [9], presenta dos cambios significativos. El primero se corresponde con la consideración del cobro y el pago por el agua transaccionada

dentro del atributo del MBT. En este sentido conviene apuntar que el modelo ha supuesto, como criterio simplificador, que la presencia del mercado no afecta al resto de atributos. El otro cambio reseñable es la incorporación de las compras y ventas de agua en la restricción de equilibrio hídrico [10.b].

Con este planteamiento del problema de optimización de un regante individual o agente tipo *i*, el equilibrio de mercado resultante de la interacción de todos ellos puede simularse a través del siguiente problema:

$$\begin{aligned}
 & \text{Max} \sum_i K_i U_i(\vec{X}_i) = & [11] \\
 & = \sum_i K_i \left\{ \begin{aligned} & w_{MBT_i} K_{MBT_i} \left[MBT_i(\vec{X}) + \frac{1}{K_i} \sum_j \left[\left(P_m - \frac{CC_{ij}}{2} \right) V_{ij} \right] - \frac{1}{K_i} \sum_j \left[\left(P_m - \frac{CC_{ij}}{2} \right) C_{ij} \right] \right] \\ & - w_{VARI} K_{VARI} VAR_i(\vec{X}_i) - w_{MOT_i} K_{MOT_i} MOT_i(\vec{X}_i) \end{aligned} \right\} & [11.a] \\
 \text{s.a.:} & \sum_c X_{ci} \leq S_i & \forall i & [11.b] \\
 & \sum_i \sum_c NH_c X_{ci} \leq \sum_i D_i S_i & & [11.b] \\
 & \sum_c NH_c X_{ci} + \sum_j V_{ij} - \sum_j C_{ij} \leq D_i S_i & \forall i & [11.c] \\
 & U_o_i \leq U_i & \forall i & [11.d] \\
 & A_i \cdot \vec{X}_i \leq \vec{B}_i & \forall i & [11.e] \\
 & X_{ci} \geq 0; P_m \geq 0; V_{ij} \geq 0; C_{ij} \geq 0 & \forall c \forall i \forall j & [11.f]
 \end{aligned}$$

donde K_i es un factor normalizador empleado para modular la representatividad de cada agente «tipo». Efectivamente, para permitir una suma de las utilidades alcanzadas por cada uno de ellos de forma homogénea, este factor se ha hecho equivalente, en cada caso *i*, al coeficiente de la superficie total representada por el agente «tipo» partido por la superficie promedio del mismo (ST_i/S_i). Así, el sumatorio planteado como función objetivo adiciona por igual la utilidad generada por cada ha de regadío considerado para su correspondiente productor.

Con este modelo se asume que el equilibrio de mercado se alcanza cuando se maximiza la suma, debidamente ponderada, de las utilidades U_i de todos los agentes considerados. No obstante, conviene comentar que, para que se pueda simular el mercado de forma adecuada, se ha hecho necesario incluir dos restricciones nuevas con respecto al modelo [10]. La primera, recogida en [11.b], se corresponde con el balance agregado de agua, de tal forma que se asegure que el total de agua consumida a nivel de cuenca sea menor o igual al conjunto de recursos disponibles.

En [11.d] se recogen un conjunto de restricciones también necesarias para garantizar que en el mercado nadie «pierde». Efectivamente, al tratarse de intercambios voluntarios, los diferentes agentes sólo participarán en el mercado en la medida que puedan aumentar su bienestar (incremento de su utilidad). Por este motivo se obliga a que la utilidad alcanzada en el equilibrio por cada agente (U_i) sea superior a la utilidad que cada uno de ellos poseía antes de producirse los intercambios (U_{0i}); es decir, aquella que tendrían en el caso de no existir mercado.

3. ZONA DE ESTUDIO

El Valle del Duero es una cuenca compartida entre España y Portugal. No obstante, el caso de estudio aquí presentado considera únicamente la parte española, que ocupa la mayor parte de la misma, con casi 78.000 km². La zona estudiada cuenta con 555.582 ha de riego, que consumen anualmente como media 3.500 hm³ de agua (unos 6.300 m³/ha brutos al año). De hecho, el regadío es el uso principal del agua en la cuenca, utilizando el 93 por ciento del total de recursos, mientras que los usos urbanos (uso prioritario en todo caso) equivalen tan sólo al 6 por ciento, y los usos industriales apenas el 1 por ciento del total. Esta preponderancia del regadío permite pensar que las mayores oportunidades que tiene el mercado a nivel de cuenca para mejorar la eficiencia en el uso del recurso se encuentran en las transferencias intrasectoriales de la agricultura. Así, simulando el mercado de agua de riego exclusivamente se puede analizar en buena medida los impactos que tendría el mercado para el conjunto de la cuenca.

El conjunto del regadío del Duero, como legalmente establece la normativa española, se encuentra dividido en zonas regables gestionadas por asociaciones de regantes denominadas Comunidades de Regantes. Para el presente trabajo, dada la imposibilidad práctica que considerar todas ellas, se han escogido 7 comunidades representativas del de la cuenca, que agrupan 51.343 ha regadas (9,2 por ciento del total del regadío del Duero). En el cuadro 1 puede encontrarse la información relativa a sus características básicas.

En cada zona regable considerada se ha realizado una encuesta para la obtención de información primaria al objeto de poder aplicar posteriormente la técnica cluster y definir las características de cada agente «tipo». En total se han encuestado 367 agricultores, una media de 52 por zona regable.

Cuadro 1

CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LAS 7 ZONAS REGABLES ANALIZADAS

Características	CR Canales Bajo Carrión	CR Canal Margen Izda. del Porma	CR Canal General del Páramo	CR Canal del Pisuerga	CR Canal de San José	CR de la Presa de la Vega de Abajo	CR Virgen del Aviso
Provincia	Palencia	León	León	Palencia y Burgos	Zamora y Valladolid	León	Zamora
Altitud (m)	775 – 825	750 – 830	800	760 – 830	645	800	645
Precipitación media	527 – 448	732	498	427	364	498	364
Índice L. Turc	30 – 35	30 - 35	30 - 35	35	35 - 40	30 - 35	35 - 40
Fecha puesta en riego	Principios años 70	Principios años 70	Principios años 40	Principios años 60	Principios años 50	Carácter histórico	Principios años 60
Ha regadas	6.588	12.386	15.554	9.392	4.150	1.403	1.870
N.º de propietarios	899	3.500	5.950	2.715	1.406	1.500	820
Superf. media explot. regadío (ha) (*)	48,0	49,4	31,9	42,2	25,0	17,1	15,8
Asignac. agua (m ³ /ha)	5.950	6.250	6.587	8.100	8.192	6.105	8.021
Sistemas reparto agua	A la demanda	Turnos cada 12 días	Turnos cada 14 días	Turnos cada 8 días	Turnos cada 8 días	Turnos cada 8 días	Turnos cada 12 días
Sistemas de riego	A pie y aspersión para remolacha	A pie y aspersión para remolacha	A pie y aspersión para remolacha y alubia	A pie y aspersión para remolacha y alfalfa	A pie y aspersión para remolacha y alfalfa	A pie y aspersión para remolacha	A pie y aspersión para remolacha
Total tarifa agua (€/ha)	40,06	66,10	85,34	60,59	85,94	36,06	Variable
Edad redes riego	30 años	20 años	50 años	30 años	40 años	40 años	40 años
Eficiencia sistemas riego	65% en riego a pie y 70% en riego por aspersión	75% en riego a pie y 80% en riego por aspersión	65% en riego a pie y 70% en riego por aspersión	60% en riego a pie y 65% en riego por aspersión	65% en riego a pie y 70% en riego por aspersión	65% en riego a pie y 70% en riego por aspersión	60% en riego a pie y 65% en riego por aspersión
N.º de encuestas	52	54	61	32	68	34	66
N.º de clusters	4	4	2	3	3	3	3

(*) Las explotaciones de regadío están compuestas en parte por tierra en propiedad del propio agricultor y en parte por tierras en arrendamiento. Este hecho explica las diferencias existentes entre el número de propietarios y en número de agricultores, siendo éste último muy inferior al primero.

En cada comunidad de regantes se han definido los distintos grupos homogéneos a través de la técnica cluster, obteniéndose así la información de los agentes «tipo» a modelizar. En total se han obtenido un total de 22 grupos, tal y como quedan recogidos en el cuadro 2. En este mismo cuadro pueden apreciarse las características básicas de cada uno de ellos.

Cuadro 2

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS AGENTES «TIPO»

Zona regable	Cód.	Denominac.	% / nº agric.	% / sup. total	Principales cultivos	Ponderaciones		
						W _{MBT}	W _{VAR}	W _{MOT}
CR Canales Bajo Carrión	11	Agricultores a tiempo parcial	22,9%	17,8%	Maíz, cereales invierno y remolacha	0,724	0,276	0,000
	12	Agricultores-ganaderos	21,3%	24,2%	Maíz, alfalfa y cereales invierno	0,465	0,535	0,000
	13	Pequeños agricultores de perfil comercial	27,8%	8,9%	Maíz, alfalfa y cereales invierno	1,000	0,000	0,000
	14	Agricultores aversos al riesgo	27,8%	49,2%	Cereales invierno y maíz	0,671	0,329	0,000
CR Canal Margen Izda. del Porma	21	Grandes agricultores con perfil comercial	40,7%	45,8%	Maíz	1,000	0,000	0,000
	22	Agricultores a tiempo parcial	5,6%	5,4%	Cereales invierno y maíz	0,302	0,698	0,000
	23	Agricultores aversos al riesgo	16,7%	16,6%	Cereales invierno, maíz y girasol	0,479	0,521	0,000
	24	Agricultores-ganaderos	37,0%	32,1%	Maíz y alfalfa	0,852	0,148	0,000
CR Canal del Páramo	31	Agricultores neutrales al riesgo	72,0%	69,6%	Maíz, remolacha y alubia	1,000	0,000	0,000
	32	Agricultores diversificadores de riesgo	28,0%	30,4%	Maíz, cereales invierno y remolacha	0,785	0,215	0,000
CR Canal del Pisuerga	41	Agricultores de carácter conservador	20,6%	12,5%	Cereales invierno y alfalfa	0,000	1,000	0,000
	42	Grandes agricultores con orientación comercial	35,3%	57,5%	Cereales de invierno, remolacha y maíz	0,425	0,575	0,000
	43	Agricultores - ganaderos	44,1%	38,2%	Alfalfa, cereales de invierno, remolacha y maíz	0,623	0,377	0,000
CR Canal de San José	51	Agricultores diversificadores del riesgo	35,3%	39,6%	Maíz, cereales invierno y alfalfa	0,544	0,456	0,000
	52	Jóvenes agricultores de perfil comercial	35,3%	40,3%	Maíz y remolacha	0,955	0,045	0,000
	53	Agricultores maiceros	29,4%	20,1%	Maíz	1,000	0,000	0,000
CR Presa de la Vega de Abajo	61	Pequeños agricultores envejecidos	20,6%	11,5%	Maíz y cereales invierno	0,967	0,033	0,000
	62	Remolacheros	29,4%	31,4%	Maíz y remolacha	1,000	0,000	0,000
	63	Jóvenes agricultores de perfil comercial	50,0%	57,1%	Maíz, remolacha y cereales invierno	1,000	0,000	0,000

Cuadro 2 (Continuación)

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS AGENTES «TIPO»

Zona regable	Cód.	Denominac.	% / nº agric.	% / sup. total	Principales cultivos	Ponderaciones		
						W _{MBT}	W _{VAR}	W _{MOT}
CR Virgen del Aviso	71	Agricultores de perfil comercial	45,5%	23,2%	Maíz, remolacha y cereales invierno	1,000	0,000	0,000
	72	Agricultores diversificadores de riesgos	24,2%	33,4%	Maíz, cereales invierno y remolacha	0,448	0,552	0,000
	73	Agricultores de perfil conservador	30,3%	43,4%	Cereales invierno, girasol y maíz	0,197	0,803	0,000

A cada uno de los agentes «tipo» obtenido del cluster se le ha aplicado la metodología multicriterio ya descrita para el cálculo de ponderaciones de los diferentes atributos propuestos *a priori*. Los resultados obtenidos pueden igualmente observarse en el cuadro 2. De estos cabe destacar, primero, las importantes diferencias detectadas entre los vectores de pesos de los distintos grupos, evidenciado la disparidad existente en las MAUF que pretende optimizar cada uno de ellos.

En segundo lugar, conviene apuntar también que para todos los casos el peso otorgado al atributo MOT ha sido cero. Esta circunstancia no quiere decir necesariamente que los productores ignoren el objetivo de maximizar su tiempo de ocio y minimizar la complejidad de gestión. Efectivamente, dada la inexistencia de conflicto entre el objetivo de minimizar el riesgo y el de minimizar las necesidades de mano de obra, puede ser que el peso atribuido al atributo de la VAR se corresponda en realidad a la importancia asignada por los productores a ambos objetivos de forma conjunta.

4. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE MERCADOS

En esta sección se analizan los resultados obtenidos en la simulación de los distintos escenarios planteados. Para ello se toma como escenario base aquel que considera la existencia del mercado (escenario «con mercado»), en el que se permiten intercambios de agua entre los agricultores que pertenecen a una misma comunidad de riego (transferencias *intracomunitarias*), así como entre las distintas comunidades de regantes (transferencias *intercomunitarias*). Así, primeramente, se analiza el impacto económico y social que en estas circunstancias tendría una disminución en el agua disponible para el conjunto de la cuenca. Para ello, se parametrizará la dotación dispo-

nible del recurso (D_i). Los resultados de este escenario se pretenden comparar con los correspondientes en el caso en que no se considere la introducción de un sistema de mercado de agua (escenario «sin mercado»). Con ello podrán analizarse las mejoras de eficiencia económica (medida como el margen bruto total generado en la cuenca) y el impacto social (estimado como la cantidad de mano de obra empleada para el conjunto de zonas regables consideradas) que la puesta en marcha de esta institución permite para la zona de estudio. Además de los cambios en la disponibilidad de agua, se simularán diferentes posibilidades con relación a los costes de transacción y al precio del agua de riego. Al igual que para el análisis propuesto para la parametrización de la disponibilidad de agua, las variables relevantes analizadas en cada una de estas simulaciones son tres: el volumen de agua transferido en el mercado, el margen bruto agregado y la demanda total de mano de obra.

4.1. Influencia de la disponibilidad de agua

Pese a que el valle del Duero no presenta fuertes variaciones en la disponibilidad de agua por efecto de las sequías, hay que indicar que éstas pueden darse con mayor o menor intensidad cada siete u ocho años. Esta circunstancia hace interesante examinar los efectos que una reducción en la disponibilidad de agua tiene sobre las cantidades de agua transferidas en el escenario «con mercado». Para ello, se han modificado las restricciones 11.b y 11.c del modelo de equilibrio ya comentado, sustituyéndolas por las siguientes expresiones:

$$\sum_i \sum_c NH_c X_{ci} \leq \sum_i \lambda D_i S_i \quad [11.b.bis]$$

$$\sum_c NH_c X_{ci} + \sum_j V_{ij} - \sum_j C_{ij} \leq \lambda D_i S_i \quad [11.c.bis]$$

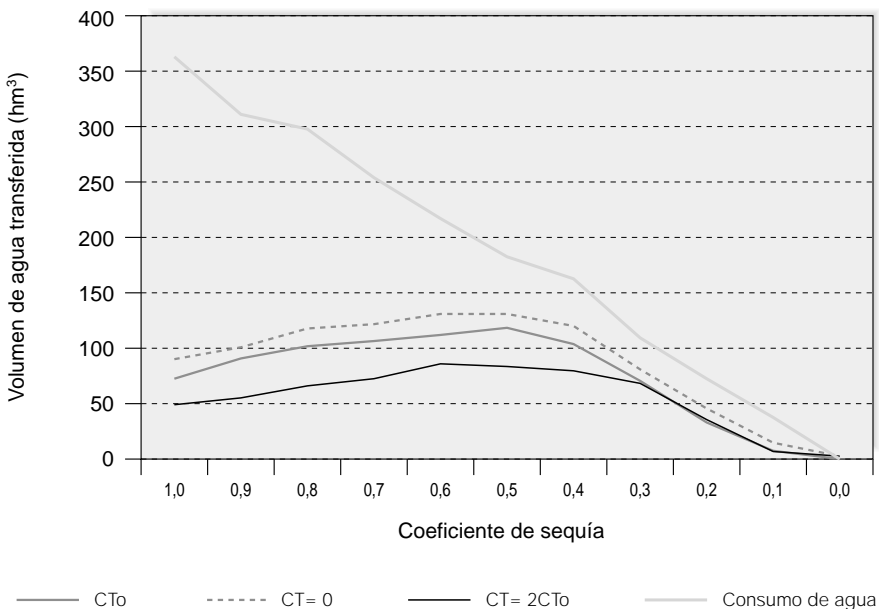
donde las dotaciones iniciales (D_i) se multiplican por un «coeficiente de sequía» λ que toma valores entre 0 y 1, de tal manera que se modifiquen los recursos de que hipotéticamente podrían disponer los agentes «tipo» para realizar sus planes de cultivo y tomar sus decisiones de transferencia (compra o venta) de agua. Así, cuando λ toma valor λ , la dotación de agua es equivalente a la dotación teórica, mientras que si el valor de λ es 0, la disponibilidad de agua es nula. El coeficiente λ se ha parametrizado con el fin de obtener una curva de puntos que refleje la trayectoria de las variables relevantes en función de la cantidad de agua de riego disponible para su uso.

El gráfico 1 muestra la variación del volumen de agua transferido como consecuencia de la introducción de un sistema de mercado de agua (línea «CT₀»), así como la evolución del consumo total del recurso (línea «Volumen consumido») cuando λ varía. En la situación de ausencia de sequía ($\lambda=1$), el volumen de agua consumido a escala agregada asciende a unos 362 hm³, de los cuales 71 hm³ (el 19 por ciento) serían intercambiados hipotéticamente entre los agentes del mercado. A medida que las disponibilidades de agua se reducen (λ disminuye), puede observarse que las transferencias de agua en el mercado siguen una trayectoria ascendente hasta alcanzar un valor máximo que se corresponde con un valor del coeficiente λ igual a 0,5. En esta situación el volumen total transferido alcanza 117 hm³, que supone un 64 por ciento del agua consumida para ese valor de λ (181 hm³). A partir de ese punto, y como consecuencia de la escasez creciente de agua (valores de λ inferiores a 0,5), los intercambios se reducen en términos absolutos hasta anularse.

Un análisis más detallado de los resultados de la parametrización de λ requiere de una serie de comentarios adicionales. Así, en primer lugar convendría apuntar que la evolución de las transferencias antes apuntadas es la consecuencia agregada de la toma de decisiones indi-

Gráfico 1

Efecto de la disponibilidad de agua sobre las transferencias



viduales (planes de cultivo) con relación al uso del agua ante situaciones de escasez creciente. Efectivamente, conforme aumenta el coeficiente de sequía, los regantes deben modificar su estrategia de cultivos, reduciendo la superficie dedicada a aquellos cultivos con mayores requerimientos hídricos (también los de mayor rentabilidad), o acudiendo al mercado para adquirir cantidades adicionales de agua, pagando por ello el precio de mercado resultante en cada caso. En ambos casos el resultado es una pérdida de utilidad de agricultor, en la medida que supone una disminución del margen bruto total de la explotación.

En este sentido, dado el comportamiento de los regantes tendente a maximizar sus respectivas funciones de utilidad, el mercado permite una reasignación del agua llevando el recurso allí donde genere mayor utilidad. Como la utilidad que genera este factor productivo está determinada tanto por aspectos «objetivos» (productividad del agua en función de las características edafo-climáticas y resto de condiciones estructurales de las explotaciones) como «subjetivos» (ponderación del atributo MBT), las transferencias de agua se destinan preferentemente hacia aquellas zonas regables con mayores potencialidades productivas, así como a los productores que tienen un perfil más comercial, es decir, aquellos que experimentan mayores incrementos de utilidad por el aumento del beneficio (productores con mayores valores de w_{MBT}).

Este comportamiento del mercado se confirma observando el comportamiento individual de los diferentes agentes «tipo», tal y como muestra el cuadro 3. En éste se refleja la condición de comprador (C) o vendedor (V) de los distintos agentes en cuatro situaciones de dotación de agua. De estos resultados desagregados se deduce efectivamente cómo las transferencias se dirigen allá donde el agua proporcione una utilidad mayor, es decir, hacia los agentes «tipo» con mejores condiciones edafo-climáticas en sus explotaciones (mayores rendimientos de los cultivos) y para aquellos con mayores valores de w_{MBT} .

Del anterior cuadro también es interesante destacar, como otro elemento que determina la dirección de las transacciones, la localización física de la explotación. Efectivamente, al no existir apenas infraestructuras para el transporte del agua, la única posibilidad real para la realización de transferencias es emplear los cauces naturales. De esta forma las zonas regables situadas en la cola de la cuenca (p.e. en nuestro caso las comunidades del Canal de San José o Virgen del Aviso) tienen cierta ventaja comparativa, al poder comprar agua de todas aquellas comunidades situadas «aguas arriba» (mayor oferta

Cuadro 3

POSICIÓN EN EL MERCADO DE LOS AGENTES «TIPO» MODELIZADOS

Zona regable	Cód.	Coeficientes de sequía (precio de mercado)			
		1,00 $P_m = 0,005 \text{ €/m}^3$	0,75 $P_m = 0,02 \text{ €/m}^3$	0,50 $P_m = 0,06 \text{ €/m}^3$	0,25 $P_m = 0,15 \text{ €/m}^3$
<i>CR Canales Bajo Carrión</i>	11	C	C	NS	NS
	12	NS	NS	C	C
	13	C	C	C	C
	14	NS	NS	V	V
<i>CR Canal Margen Izda. del Porma</i>	21	C	V	V	V
	22	V	V	C	C
	23	V	V	C	C
	24	C	V	V	V
<i>CR Canal del Páramo</i>	31	C	C	C	C
	32	C	C	C	C
<i>CR Canal del Pisuerga</i>	41	V	V	V	V
	42	V	V	V	V
	43	C	C	C	V
<i>CR Canal de San José</i>	51	V	V	C	C
	52	V	V	C	C
	53	NS	NS	C	C
<i>CR Presa de la Vega de Abajo</i>	61	V	V	V	V
	62	C	C	V	V
	63	V	V	V	V
<i>CR Virgen del Aviso</i>	71	NS	NS	C	C
	72	V	C	C	C
	73	V	V	C	C

C: posición compradora, V: posición vendedora, NS: posición no significativa.

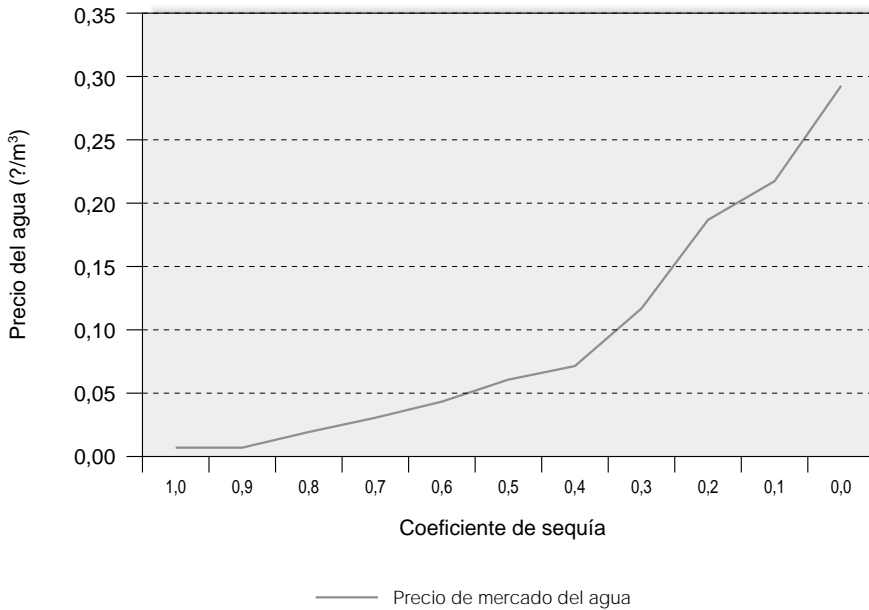
disponible). Esta circunstancia no es recíproca, y estas últimas zonas regables situadas más cerca de la cabecera de la cuenca disponen de menos posibilidades de comprar agua (menor oferta disponible).

Como ya se ha comentado, si se considera un comportamiento de los regantes maximizador de sus respectivas funciones de utilidad, el mercado llegará en cada caso a una situación de equilibrio en que la utilidad marginal del agua para todos los usuarios se equipare con el correspondiente precio de equilibrio. El gráfico 2 muestra la evolución de este precio de mercado del agua para los diferentes valores del coeficiente de sequía.

Como era de prever, la escasez creciente del agua determina que para todos los usuarios se aumente su utilidad marginal, incrementándose con ello el precio de mercado. Así, este asciende desde un valor de 0,005 €/m³ para una situación hidrológica normal ($\lambda = 1$), hasta un valor de 0,29 € para el último metro cúbico del recurso disponible ($\lambda=0$).

Gráfico 2

Precio de equilibrio en el mercado



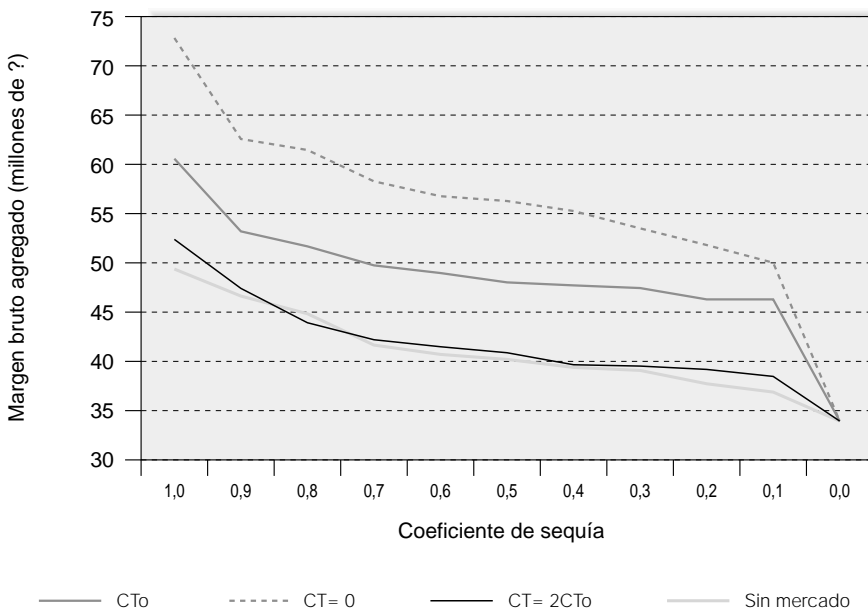
Otro aspecto a destacar de esta primera simulación es el resultado obtenido para la situación de abastecimiento normal ($\lambda=1$), que indica que las transferencias de agua podrían llegar al 19 por ciento del total de recursos. Sin embargo, es evidenciable que esto no ocurre en el contexto actual, donde las transferencias reales son prácticamente nulas. Las causas de esta parálisis del mercado de agua en la cuenca son múltiples. Por un lado, esta situación se debe a la falta de un completo desarrollo normativo, que termine de definir convenientemente las reglas prácticas que deben regir los mercados. Concretamente, todavía se está a la espera de una orden sobre «consumos de referencia» de las diferentes zonas regables, que determine la cantidad máxima de derechos que pueden arrendar los titulares de las concesiones. Sin estos valores los organismos de cuenca pueden dificultar su visto bueno a las transferencias que tengan origen agrario. En cualquier caso, éste no debería ser una causa legal para impedir una solicitud de contrato de cesión. Otras causas, como posteriormente se comentará, son la inseguridad jurídica que produce la venta de agua y la consideración de propiedad común (no mercantilizable) que tienen sobre el agua buena parte de los regantes.

En el gráfico 3, se muestra la evolución del *margen bruto agregado* (suma del margen bruto total de todos los agentes del mercado debidamente ponderado) en función del coeficiente de sequía. Esta variable agregada se puede utilizar como indicador de la eficiencia económica total del sistema. Así, se puede observar claramente la ganancia de eficiencia originada por la introducción del mercado de agua (línea «CTo») en relación con el escenario «sin mercado» (línea «sin mercado»). Efectivamente, puede comprobarse cómo en condiciones de ausencia de escasez de agua, el margen bruto «con mercado» alcanza los 60 millones de euros, un 18 por ciento más que en la situación «sin mercado», en la que se obtienen 49 millones de euros. Esta mejora de la eficiencia económica se da igualmente para todos los valores posibles de λ (simulaciones de escasez), con unos porcentajes de incremento del margen agregado que oscilan entre un 12 y un 20 por ciento.

El motivo de estas ganancias significativas en la eficiencia global del sistema radica en que las transferencias de agua permite un cambio en las decisiones de cultivo de los agentes si se compara con el escenario «sin mercado». Efectivamente, para cada situación de λ , el escenario «con mercado» dedica a nivel agregado una mayor superficie a los cultivos de mayor valor añadido, que coinciden con aquellos que tienen

Gráfico 3

Efecto del mercado sobre el margen bruto agregado (eficiencia económica)

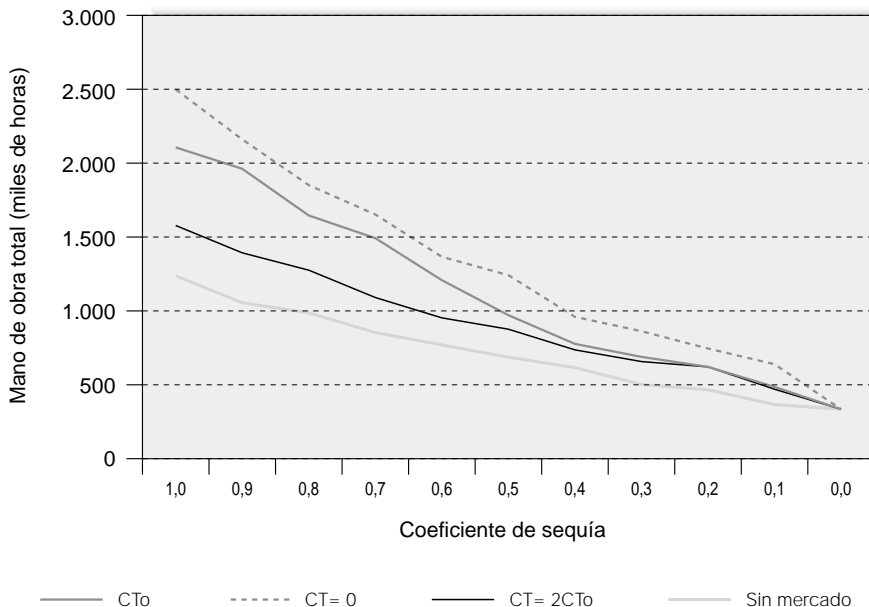


mayores necesidades de agua y mano de obra (hortícolas, remolacha o maíz), en perjuicio de los cultivos de regadío más extensivos y con menores exigencias de factores productivos agua y mano de obra (cereales de invierno). Así, aunque la superficie de regadío dedicada a cultivos de secano (menos rentables) se incrementa para posibilitar el balance global de agua, el resultado final es claramente positivo, incrementándose el beneficio agregado en el ámbito de la cuenca.

Debido a la existencia de una correlación positiva entre el margen bruto y la mano de obra, el aumento en la eficiencia económica de la región provocada por la introducción del mercado lleva consigo un aumento en la *generación de empleo*. El gráfico 4 muestra la variación del uso de factor trabajo cuando el coeficiente λ se modifica, observándose una trayectoria ascendente de la variable agregada de la mano de obra demanda ante valores crecientes del coeficiente de sequía. De igual forma se comprueba cómo en el escenario «con mercado» la demanda de mano de obra agrícola aumenta entre un 20 y un 45 por ciento con respecto al escenario «sin mercado». Este instrumento, por tanto, es adecuado desde la perspectiva de su impacto social, ya que puede aliviar las situaciones actuales de subempleo y estacionalidad de la mano de obra, favoreciendo así la fijación de población al territorio.

Gráfico 4

Efecto del mercado sobre la mano de obra total (impacto social)



4.2. Influencia de los costes de transacción

Un segundo grupo de simulaciones plantea el escenario «con mercado» en distintos contextos de costes de transacción, de forma que la situación de costes iniciales (los ya apuntados en el apartado 2.4; $CT=CT_0$), se compara con una situación de mercado con costes de transacción nulos ($CT=0$) y posteriormente con otro escenario en que estos costes se duplican ($CT=2CT_0$). Estas simulaciones permiten determinar la influencia clave que tiene el nivel de costes de transacción sobre el volumen de intercambios llevados a cabo.

El gráfico 1 muestra la variación del volumen de agua transferido como consecuencia de la parametrización de λ para las distintas situaciones de costes de transacción en el mercado. Los resultados indican una evolución similar en todos los escenarios de costes, de tal manera que los intercambios alcanzan un valor máximo cuando el coeficiente λ toma el valor 0,5. No obstante, conviene indicar que, como es lógico, a medida que se consideran mayores costes de transacción, menores son las cantidades intercambiadas. Así por ejemplo, las transferencias de agua en su punto máximo con costes nulos superan en un 8 por ciento al escenario con costes iniciales, mientras que con los costes duplicados se reducen en un 25 por ciento.

Esta variación se refleja también en los niveles de margen bruto y mano de obra empleada (gráficos 3 y 4). Así, para los distintos valores de λ , el margen agregado sin costes de transacción se encuentra en torno a un 15 por ciento por encima del margen con costes iniciales, con un incremento medio en la demanda de mano de obra agregada de un 15 por ciento, mientras que con un nivel doble de costes el margen bruto agregado se sitúa como promedio un 16 por ciento por debajo del inicial, con una pérdida de mano de obra cercana al 17 por ciento.

Estos resultados ponen de manifiesto la conveniencia de mejorar el marco jurídico que establece el mercado del agua, con el fin de que los costes de transacción sean tan bajos como sea posible. Sólo así se pueden optimizar los beneficios económicos y sociales ya apuntados que puede generar el mercado.

4.3. Mercados de agua y tarifación del agua de riego

Como es bien sabido, la Directiva Marco del Agua de la Unión Europea (2) ha impulsado la utilización de las tarifas sobre el agua como

(2) Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas (DOCE serie L 22-XII-200).

instrumento de gestión adecuado para el control de las demandas crecientes. Ello parece indicar, como futuro previsible, un nuevo escenario de aumento en los precios pagados por el uso del agua de riego a través de tarifas volumétricas, y no por superficie como hasta ahora. Tal escenario se ha simulado en este trabajo con el fin de evaluar el efecto que provocaría la introducción de una tarifa volumétrica sobre el agua de riego.

La simulación de este escenario requiere un cambio de la expresión 11, que quedará en este caso como sigue:

$$\begin{aligned} \text{Max} \sum_i K_i U_i(\vec{X}_i) = & \quad \quad \quad [11\text{bis}] \\ = \sum_i K_i & \left\{ \begin{aligned} & w_{\text{MBT}_i} K_{\text{MBT}_i} \left[\text{MBT}_i(\vec{X}_i) + \frac{1}{K_i} \sum_j \left[\left(P_m - \frac{CC_{ij}}{2} \right) V_{ij} \right] - \frac{1}{K_i} \sum_j \left[\left(P_m - \frac{CC_{ij}}{2} \right) C_{ij} \right] - T D_i \right] \\ & - w_{\text{VAR}_i} K_{\text{VAR}_i} \text{VAR}_i(X_i) - w_{\text{MOT}_i} K_{\text{MOT}_i} \text{MOT}_i(X_i) \end{aligned} \right\} \end{aligned}$$

donde T es la tarifa unitaria medida en €/m³. La simulación se ha hecho considerando cuatro situaciones de disponibilidad de agua y dos valores distintos de T: 0,03 €/m³ y 0,06 €/m³. Los resultados obtenidos son los que muestran el cuadro 4.

Cuadro 4

RESULTADOS CON DISTINTAS TARIFAS VOLUMÉTRICAS DE AGUA

	T = 0,00 €/m ³				T = 0,03 €/m ³				T = 0,06 €/m ³			
Coefficiente de sequía (λ)	1,00	0,75	0,50	0,25	1,00	0,75	0,50	0,25	1,00	0,75	0,50	0,25
Transferencias (hm ³)	71,1	102,8	117,2	44,3	68,3	85,3	95,4	41,4	50,6	64,5	86,3	28,2
Margen bruto agregada (10 ⁶ €)	60,0	50,5	48,3	47,4	52,2	46,3	44,7	42,2	39,0	36,1	42,1	31,7
Mano de obra total (10 ³ horas)	2.110	1.519	979	662	1.870	1.444	950	601	1.644	1.267	881	416

Como es lógico, la introducción de una tarifa reduce el consumo de agua y las transferencias, así como la rentabilidad y el uso del factor trabajo, tal y como muestra el anterior cuadro. En el caso de T=0,03 €/m³, los intercambios disminuyen entre un 4 y un 18 por ciento según el valor de λ, y entre un 26 y un 37 por ciento para T=0,06 €/m³. Este descenso en el volumen de agua transferido va acompañado de una caída en el margen bruto agregado, y por tanto

en la mano de obra demanda en el ámbito de la cuenca con respecto a una situación de $T=0$. Las reducciones medias del margen bruto, con respecto a la situación de tarifa nula, son de un 10 y un 27 por ciento para 0,03 y 0,06 €/ha respectivamente, que provocan una caída media de un 7 y un 21 por ciento en la cantidad total de mano de obra total empleada.

5. CONCLUSIONES

Del trabajo aquí expuesto pueden deducirse conclusiones tanto del enfoque metodológico seguido como de los resultados obtenidos de la aplicación práctica realizada.

Desde la perspectiva metodológica, convendría resaltar las ventajas que presenta la modelización propuesta. Efectivamente, como ha podido comprobarse a través de la validación de los modelos que simulan el comportamiento individual de los regantes (modelo [9]), las decisiones productivas que éstos toman (planes de cultivo y uso de insumos) no pueden explicarse (modelizarse) teniendo únicamente en cuenta las diferencias en sus características estructurales (clima, suelo, etc.) y la dispar disponibilidad de factores (maquinaria, cupos de producción,...), asumiendo un comportamiento maximizador del beneficio. Para poder simular correctamente el comportamiento de estos decisores se requiere, además, tener en cuenta la función de utilidad que éstos presentan en un contexto multicriterio. Asumida así la necesidad de analizar el proceso de toma de decisiones de los agricultores dentro del paradigma MCDM, es evidente que el uso que éstos hacen del agua (asignación a sus diferentes cultivos y/o su intercambio en el mercado) depende de la *utilidad* que este factor les proporciona (participación en la consecución de los objetivos que los regantes tratan de optimizar simultáneamente), y no sólo de su *productividad* (participación en la generación de beneficios).

En este sentido, el enfoque planteado creemos que se acerca más a la realidad al asumir que la reasignación de agua realizada a través de los mercados se produce desde los usos generadores de menor utilidad hacia los que generan mayor utilidad, hasta llegar a un punto de equilibrio en el cual las *utilidades marginales* que proporciona el agua a todos los usuarios se equiparan al precio de mercado resultante, una vez descontados los costes de transacción. Con ello, este planteamiento utilitario supone una extensión de la Teoría Económica clásica que, al asumir en todo caso la maximización de beneficios como objetivo único de los decisores, define el punto de equilibrio del

mercado como aquel en el que el *valor de las productividades marginales* del agua de todos los usos se igualan al precio de mercado.

En cuanto al caso de estudio desarrollado, también conviene destacar el interés que el modelo teórico planteado tiene para una mejor comprensión y modelización de los mercados de agua en el mundo real. Así, de los resultados obtenidos del mismo, se pueden obtener igualmente conclusiones de interés práctico. A este respecto cabe destacar el importante potencial que tienen los mercados para aumentar tanto la eficiencia económica como la demanda de empleo en el sector agrario, especialmente en períodos de escasez.

Los resultados obtenidos confirman que este impacto positivo, tanto desde la perspectiva económica como social, se debe a las transferencias que se realizan preferentemente hacia aquellos productores con perfil más comercial (mayores ponderaciones de w_{MBT}), con mayores ventajas competitivas (condiciones edafo-climáticas más favorables) y con una ventajosa localización física (situados aguas «abajo»).

No obstante, conviene apuntar que para conseguir que estas teóricas ganancias de bienestar para el conjunto de la sociedad se consigan realmente se hacen necesarios una serie de cambios en el marco legislativo y social existente en la zona de estudio, al igual que en la mayoría de cuencas españolas.

Respecto a la cuestión legal, es preciso que la normativa aplicable, sin menoscabo del necesario control público de las externalidades que el mercado pueda generar, facilite de forma efectiva la realización de transacciones. Para ello se podrían tomar medidas tendentes a estructurar el mercado para tratar de minimizar los costes de transacción. En este sentido sería útil, por ejemplo, la constitución de agencias de transacción, no sólo como propone la legislación tipo «banco» para circunstancias excepcionales de escasez, sino también tipo «bolsa», como centros de contratación donde cada usuario haría públicas sus ofertas y demandas individuales de agua, de forma que se pudieran «casar» operaciones de compraventa de forma automática, a unos precios competitivos (cotizaciones). Con ello se podrían disminuir sensiblemente los costes relacionados con la búsqueda de información.

Igualmente deberían tomarse medidas para eliminar la inseguridad jurídica que provoca la venta de agua. En la actualidad, simultáneamente a la posibilidad de mercado, la normativa vigente establece la posibilidad de reducir, e incluso retirar por completo, la dotación de agua otorgada a los usuarios en caso de que éstos no la usen de

forma provechosa. En estas circunstancias, no son pocos los regantes que opinan, ante el silencio administrativo, que vender en el mercado sus recursos es evidenciar que éstos «no les son necesarios», ya que no los usan para sí. De esta forma, los regantes que estarían dispuestos a vender agua temen que este tipo de operaciones, de realizarlas de forma continuada, derivarían en retirada de su concesión. Lógicamente, esta inseguridad hace que el agua ofertada en el mercado sea muy inferior a la que potencialmente se ofrecería en otras circunstancias, como ponen de manifiesto las soluciones del modelo elaborado, que no incluye este tipo de consideraciones.

Mucho más compleja de cambiar es la componente social antes aludida. Efectivamente, como ya se ha puesto de manifiesto en diversas ocasiones (por ejemplo, en Garrido *et al.*, 1996 u Ortiz y Ceña, 2001), la tradición histórica del uso de agua de riego en España hace que ésta sea considerada como un bien de propiedad común, haciendo que la mayoría de los regantes piensen que este recurso no debería ser mercantilizable. Esta circunstancia se plasma incluso en las ordenanzas que regulan la gestión interna del agua dentro de las comunidades de regantes, que establecen criterios solidarios de reparto del agua, excluyendo en todo caso la posibilidad de intercambios comerciales entre sus comuneros. Así pues, además de la necesaria adaptación de las ordenanzas al nuevo marco institucional (posibilidad de operar en los mercados de agua), será necesaria una lenta evolución de la mentalidad de los regantes hacia la consideración del agua como bien económico y, por tanto, intercambiable en el mercado. Sólo cuando se superen los prejuicios morales de los regantes contra esta institución, el mercado operará adecuadamente, tal y como ha supuesto el modelo planteado.

En cualquier caso, todas estas causas de inoperancia del mercado representan una interesante línea de investigación para el futuro, que requiere ser abordada multidisciplinariamente por economistas, sociólogos y juristas.

BIBLIOGRAFÍA

- ARRIAZA, M.; GÓMEZ-LIMÓN, J. A. y UPTON, M. (2002): «Local water markets for irrigation in southern Spain: a multicriteria approach». *The Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 46 (1): pp. 21-43.
- BERBEL, J. y RODRÍGUEZ, A. (1998): «An MCDM approach to production analysis: An application to irrigated farms in Southern Spain». *European Journal of Operational Research*, 107: pp. 108-118.
- BJORNLUND, H. y MCKAY, J. (1998): «Factors affecting water prices in a rural water market: A South Australian experience». *Water Resources Research*, 34 (6): pp. 1.563-1.570.

- CALATRAVA, J. y 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*, 1 (2): pp. 153-173.
- COSTA, F. P. y REHMAN, T. (1999): «Exploring the link between farmers' objectives and the phenomenon of pasture degradation in the beef production systems of Central Brazil». *Agricultural Systems*, 61: pp. 135-146.
- DAY, R. H. (1963): «On aggregating linear programming models of production». *Journal of Farm Economics*, 45: pp. 797-813.
- DINAR, A. y LETEY, J. (1991): «Agricultural water marketing, allocative efficiency, and drainage reduction». *Journal of Environmental Economics and Management*, 20 (3): pp. 210-23.
- DYER, J.S. (1977) «On the relationship between Goal Programming and Multiattribute Utility Theory». *Discussion paper*, 69, Management Study Center, University of California, Los Ángeles.
- EASTER, W. K. y HEARNE, R. (1995): «Water markets and decentralized water resources management: international problems and opportunities». *Water Resources Bulletin*, 31 (1): pp. 9-20.
- EDWARDS, W. (1977): «Use of multiattribute utility measurement for social decision making» en D. E. Bell; R. L. Keeney y H. Raiffa (eds.): *Decisions*. John Wiley & Sons, Chichester.
- FARMER, P. C. (1987): «Testing the robustness of multiattribute utility theory in an applied setting». *Decision Sciences*, 18: pp. 178-193.
- FISHBURN, P. C. (1982): *The Foundations of Expected Utility*. Reidel, Dordrecht, Holland.
- GARRIDO, A.; IGLESIAS, E. y BLANCO, M. (1996): «Análisis de la actitud de los regantes ante el establecimiento de políticas de precios públicos y de mercados de agua». *Revista Española de Economía Agraria*, 178: pp. 139-162.
- GARRIDO, A. (2000): «A mathematical programming model applied to the study of water markets within the Spanish agricultural sector». *Annals of Operations Research*, 94: pp. 105-123.
- GASSON, R. (1973): «Goals and values of farmers». *Journal of Agricultural Economics*, 24: pp. 521-537.
- GÓMEZ-LIMÓN, J. A.; RIESGO, L. y ARRIAZA, M. (2003): *Multi-criteria analysis of factors use level: The case of water for irrigation*. 25th International Conference of IAAE. Durban, South Africa.
- HARPER, W. H. y EASTMAN, C. (1980): «An evaluation of goal hierarchies for small farm operations». *American Journal of Agricultural Economics*, 62 (4): pp. 742-747.
- HAZELL, P. B. R. y NORTON, R. D. (1986): *Mathematical programming for economic analysis in agriculture*. MacMillan Publishing Company, New York.
- HEARNE, R. y EASTER, K. (1995): *Water allocation and water markets. An analysis of gains-from-trade in Chile*. The World Bank, Washington.
- HORBULYK, T. M. y LO, L. J. (1998): «Welfare gains from potential water markets in Alberta, Canada» en K. W. Easter; M. W. Rosegrant A. y Dinar

- (eds.): *Markets for water. Potential and performance*. Kluwer Academic Publishers, Nueva York.
- HOUSTON, J. E. y WHITTLESEY, N. K. (1986): «Modelling agricultural water markets for hydropower production in the Pacific Northwest». *Western Journal of Agricultural Economics*, 11: pp. 221-231.
- HOWE, C. y GOEMANS, C. (2001): *The effects of economic and social conditions on the functioning of water markets: a comparative study of the benefits and costs of water transfers in the South Platte and Arkansas River Basins in Colorado*. EAERE Annual Conference. Southampton, U.K.
- HOWE, C.; LAZO, J. y WEBER, K. (1990): «The economic impacts of agriculture-to-urban water transfers on the area of origin: a case study of the Arkansas River Valley in Colorado». *American Journal of Agricultural Economics*, 72 (5): pp. 1.200-1.209.
- HOWE, C.; SCHURMEIER, D. y SHAW Jr. W. (1986): «Innovative approaches to water allocation: the potential for water markets». *Water Resources Research*, 22 (4): pp. 439-445.
- HUIRNE, R. B. M. y HARDAKER, J. B. (1998): «A multi-attribute model to optimise sow replacement decisions». *European Review of Agricultural Economics*, 25 (4): pp. 488-505.
- KEENEY, R. L. (1974): «Multiplicative utility functions». *Operations Research*, 22 (1): pp. 22-34.
- KEENEY, R. L. y RAIFFA, H. (1976): *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade Offs*. John Wiley & Sons, Nueva York.
- KLIEBENSTEIN, J. B.; BARRETT, D. A.; HEFFERMAN, W. D. y KIRTLEY, C. L. (1980): «An analysis of farmers' perceptions of benefit received from farming». *North Central Journal of Agricultural Economics*, 2: pp. 131-136.
- LEE, T. R. y JOURAVLEV, A. S. (1998): *Los precios, la propiedad y los mercados en la asignación del agua*. CEPAL (Naciones Unidas), Santiago de Chile.
- ORTIZ, D. y CEÑA, F. (2001): «Los derechos de propiedad en la agricultura de regadío: su situación frente al cambio institucional». *Economía agraria y Recursos naturales*, 1 (2): pp. 93-110.
- PATRICK, F. y BLAKE, B. F. (1980): «Measurement and Modelling of Farmers' Goals: An Evaluation and Suggestions». *Southern Journal of Agricultural Economics*, 1: pp. 23-56.
- RANDALL, A. (1981): «Property entitlements and pricing policies for a maturing water economy». *The Australian Journal of Agricultural Economics*, 25 (3): pp. 195-220.
- SMITH, B. y CAPSTICK, D. F. (1976): «Establishing priorities among multiple management goals». *Southern Journal of Agricultural Economics*, 2: pp. 37-43.
- SOLANO, C.; LEÓN, H.; PÉREZ, E. y HERRERO, M. (2001): «Characterising objective profiles of Costa Rican dairy farmers». *Agricultural Systems*, 67: pp. 153-179.
- SPULBER, N. y SABBAGHI, A. (1994): *Economics of water resources: from regulation to privatization*. Kluwer Academic Publishers. Nueva York.

- SUMPSI, J. M.; AMADOR, F. y ROMERO, C. (1997): «On Farmers' Objectives: A Multi-Criteria Approach». *European Journal of Operational Research*, 96: pp. 64-71.
- SUMPSI, J. M.; GARRIDO, A.; BLANCO, M.; ORTEGA, C. e IGLESIAS, E. (1998): *Economía y política de gestión del agua en la agricultura*. MAPA-Mundi-Pressa. Madrid.
- THOBANI, M. (1997): «Formal water markets: why, when, and how to introduce tradable water rights». *The World Bank Research Observer*, 12 (2): pp. 161-179.
- VAUX, H. J. y HOWITT, R. E. (1984): «Managing water scarcity: An evaluation of interregional transfers». *Water Resources Research*, 20 (7): pp. 785-992.
- WEINBERG, M.; KLING, C. L. y WILEN, J. E. (1993): «Water markets and water quality». *American Journal of Agricultural Economics*, 75 (2): pp. 278-291.
- WILLOCK, J.; DEARY, I. J.; EDWARDS-JONES, G.; GIBSON, G. J.; MCGREGOR, M. J.; SUTHERLAND, A.; DENT, J. B.; MORGAN, O. y GRIEVE, R. (1999): «The role of attitudes and objectives in farmer decision making: business and environmentally-oriented behaviour in Scotland». *Journal of Agricultural Economics*, 50 (2): pp. 286-303.

RESUMEN

Simulación multicriterio de mercados de agua de regadío: el caso de la cuenca del Duero

Este trabajo desarrolla una metodología multicriterio para la simulación del mercado de agua de riego en el ámbito de una cuenca. Para ello se parte del supuesto que los regantes tratan de optimizar con sus decisiones productivas (plan de cultivos) una función de utilidad multiatributo, sometidos a una serie de restricciones que dependen de las condiciones estructurales de sus explotaciones. Así, se han definido una serie de grupos homogéneos de agricultores en relación con el uso del agua como los agentes «tipo» a considerar de forma conjunta en el modelo mercado. Dicho modelo calcula el equilibrio del mercado a través de la solución que maximiza el bienestar agregado, cuantificado como la suma de las utilidades multiatributo alcanzadas por cada uno de los agentes participantes. Esta metodología se pone en práctica para la cuenca del Duero (España), obteniéndose como principal resultado que la introducción de esta institución aumenta significativamente la eficiencia económica y la generación en empleo agrario, especialmente en circunstancias de escasez (sequías).

PALABRAS CLAVE: Mercados de agua, teoría de la utilidad multiatributo, agua de riego, Duero (España).

SUMMARY

Multicriteria simulation of irrigation water markets: The case of Duero basin

This paper develops a multi-criteria methodology to simulate irrigation water markets at basin level. For this purpose it is assumed that irrigators try to optimise personal multi-attribute utility functions with their productive decision making (crop mix), subjected to a set of constraints based upon the structural features of their farms. In this sense, farmers with homogeneous behaviour about water use have been grouped, being this groups established as agents «type» to be considered in the whole model for water market simulation. This model for market simulation calculates the equilibrium through a solution that maximises the aggregate welfare, quantified as the sum of the multi-attribute utilities reached by each one of the participating agents. This methodology has been empirically applied for the Duero basin (Northern Spain), obtaining as main result that the implementation of this institution increases economic efficiency and agricultural labour demand, particularly during shortage periods (droughts).

KEYWORDS: Water markets, multi-attribute utility theory, irrigation water, Duero valley (Spain).