

EL ANALISIS ECONOMICO DE LA DEMANDA DE AGUA EN EL REGADIO.

**Grupo de Análisis Económico del Ministerio de Medio Ambiente
Madrid Julio de 2007**

SECCION I.- LA IMPORTANCIA DE CONSIDERAR EL IMPACTO DE LOS CAMBIOS DE LA POLITICA AGRICOLA COMUN, LOS ACUERDOS COMERCIALES DE LA UE CON EL NORTE DE AFRICA Y LOS IMPACTOS DE LAS POLITICAS DE PRECIOS

1. INTRODUCCION. El análisis económico de la demanda de agua en la agricultura y la planificación del agua

La importancia de la agricultura como actividad a la que se destina la proporción más importante de los servicios del agua, justifica la necesidad de entender mejor el uso del agua en la agricultura española. Es el destino de cuatro quintas partes del agua que se regula de las fuentes superficiales y se extrae de los acuíferos. La parte, la agricultura, a través del uso de agroquímicos, es el origen de la mayor parte de la contaminación difusa que a través de la escorrentía reciben los ecosistemas hídricos. Un peso, este último, que irá aumentando a medida que mejora el control de otras fuentes puntuales de contaminación de las aguas como son los vertidos urbanos y los de origen ganadero.

Entender el funcionamiento del sector agrario y comprender el modo en que este responde y se ajusta a los cambios en las políticas públicas, los precios y, en general, a los cambios institucionales y del entorno económico, es un requisito fundamental para entender las bases mismas de la planificación hidrológica y para diseñar y valorar la efectividad y el coste de oportunidad de las medidas que se propongan para mejorar la calidad de las aguas, aumentar la garantía de suministro o cualquier otro objetivo de la política de aguas.

Parece claro que para establecer previsiones sobre el uso del agua en la agricultura y para evaluar las consecuencias de la aplicación de la DMA sobre el sector rural no es suficiente con las previsiones que pueden construirse proyectando a los próximos años de las tendencias observadas en los años o las décadas anteriores.

Hay que considerar que desde el punto de vista de la política de aguas debemos tener escenarios que consideren el modo en que los agricultores reaccionarán o adaptarán sus decisiones frente a un cambio en alguno de los factores condicionantes de la misma. Las preguntas que realmente queremos responder son, por ejemplo:

- ¿En qué medida la desvinculación de las ayudas de la PAC producirá un cambio en la orientación productiva de la agricultura española?
- ¿Cómo se diferenciarán esos efectos en las distintas regiones de acuerdo con el mayor o menor peso que históricamente hayan tenido de los incentivos del mercado o las subvenciones públicas?
- ¿Qué efecto tendría el desarme arancelario y los escenarios de liberalización comercial?

En lo que tienen que ver con la política de aguas, interesa saber las previsiones del uso del agua en la agricultura en los distintos escenarios posibles y responder a cuestiones tales como:

- ¿En qué medida la modernización de regadíos se traduce o no en una menor demanda efectiva de agua?
- ¿Cómo la cantidad demandada de agua responde a los cambios en los precios?
- ¿Cuál será el coste de oportunidad de ahorrar agua en la agricultura con el fin de destinar mayores recursos a la restauración hidrológica de los cauces fluviales o de las aguas subterráneas?

2.- ESCENARIOS

Hoy por hoy existe un amplio consenso en la idea de que la agricultura de los próximos años se parecerá cada vez menos a la de las dos décadas anteriores. Esto es así,

- En primer lugar, por los cambios en la orientación del que todavía hoy es el principal factor determinante de las decisiones de cultivo en gran parte de las regiones españolas: la llamada Política Agraria Común, que, a través de subsidios vinculados directamente a los rendimientos históricos de las cosechas, aporta importantes incentivos financieros que determinan gran parte de las orientaciones productivas del sector agrario español. Los próximos años no solo verán una disminución del volumen y del peso relativo de estas ayudas en el presupuesto de la Unión, sino también la desvinculación gradual de las ayudas de los volúmenes de producción, en beneficio de una mayor vinculación al mantenimiento de la renta rural y al cumplimiento de metas de conservación ambiental. El efecto sobre la demanda de servicios del agua para la agricultura de esta reducción de los incentivos financieros institucionales a la producción es ambiguo, y la mayor dependencia de los precios de mercado, puede tener consecuencias de signo contrario sobre la demanda de agua en unas y otras regiones. Para analizarlo hay que considerar las diferencias regionales en cuanto a incentivos, vocación agrícola y demás factores determinantes de la actividad agraria a nivel local.
- En segundo lugar, cada vez será mayor el peso relativo de los incentivos asociados a los mercados de productos. Esto no solo será consecuencia de la reorientación de la política agraria de la Unión Europea, sino también de la mayor competencia internacional no solo de los países de nuevo ingreso a la Unión sino también de la liberalización comercial de los mercados de productos básicos que se producirá en los próximos años de una manera gradual pero inevitable. La capacidad de adaptación del sector agrario a la mayor competencia dependerá del grado de desarrollo de la agricultura comercial en cada lugar y de su adaptabilidad a circunstancias que exigen para ser competitivos del desarrollo de estrategias comerciales, como la diferenciación de productos o el desarrollo de denominaciones de origen, distintas de los esquemas productivistas que han caracterizado el crecimiento reciente de la agricultura española.
- En tercer lugar, por un conjunto de fenómenos nuevos como son las posibilidades que suponen los llamados cultivos energéticos y la mayor competencia de la

agricultura con otros usos alternativos del suelo como la urbanización, los campos de golf, etc.

2. ¿Como analizar la demanda de agua en la agricultura en España?

Escala

Para analizar la demanda hay que partir de entender las decisiones de los regantes en cada zona regable, incorporando de una manera ordenada: los recursos disponibles, los precios de mercado, la tecnología, las alternativas de decisión y las decisiones observadas de los agricultores.

La agricultura, a diferencia de otras actividades económicas, es un sector que depende en muchos sentidos de las características del territorio en que se localiza. Aunque se utilice una metodología común el modelo de análisis que resulta útil para representar las decisiones de la agricultura comercial del Levante no necesariamente arrojará un buen resultado cuando se aplique al estudio de las zonas cerealistas del centro peninsular.

En otras palabras, un buen análisis debería utilizar unidades territoriales de análisis suficientemente pequeñas de modo que los datos y los análisis reflejen las especificidades locales en cuanto a recursos, tecnología, meteorología, vocación, preferencias, y otros los demás elementos que sean relevantes para explicar las decisiones en la agricultura.

De lo contrario se podría incurrir en un sesgo de información por agregación. Como aplicación práctica hay que analizar el regadío en municipios concretos, pero también sobre explotaciones tipo, por zonas regables o cualquier otra agrupación de agricultores que puedan tener un comportamiento similar frente a los estímulos externos.

Factores de análisis

La demanda de agua en el regadío es derivada de las decisiones de cultivo de los regantes dadas unas restricciones, climáticas, edafológicas y de recursos, y de coste de inputs, incluyendo el agua. Las decisiones de los regantes tiene en cuenta los márgenes de las diferentes opciones de cultivo, las ayuda existentes, el riesgo de los ingresos con diferentes opciones de cultivo y la complejidad de la gestión.

En el análisis se han de considerar dos factores productivos de los que se dispone en cantidad fija, la tierra y el agua disponible, a los que en algunos casos conviene añadir el trabajo familiar. Otros inputs, como la maquinaria, los bienes intermedios y la mano de obra contratada, están disponibles en cantidades variables a cambio de un precio.

Las decisiones de los regantes se ajustan a una serie de restricciones técnicas que en algunos casos son de carácter local, como la vocación o la orientación productiva del suelo, en otros vienen dadas por buenas prácticas necesarias para mantener las propiedades del suelo, como las rotaciones de cultivos, o por la dificultad para revisar las decisiones en el tiempo, cuando hay cultivos permanentes, o por restricciones institucionales cuando existen superficies máximas, obligación de retirar tierras del

cultivo, etc. Todos estos elementos sirven para configurar el conjunto de elecciones posibles para el regante o lo que se denomina la frontera de posibilidades de elección.

3.- Modelos de análisis

Para realizar estos análisis se ha considerado desarrollar un modelo de análisis y simulación de las decisiones de los agricultores españoles con el doble objetivo de mejorar el conocimiento de los cambios que están ocurriendo en el sector agrario, y de aportar un instrumento para informar y mejorar el diseño de las políticas de gestión del recurso hídrico.

Un modelo que permita analizar todas las variables que puedan resultar relevantes para explicar las decisiones de un agente económico, en nuestro caso un agricultor, y que cuenta con unos recursos o factores, una tecnología y un conjunto de restricciones que pueden ser de carácter técnico o institucional. En este contexto, las decisiones que toman los agricultores en la práctica deben considerarse como soluciones racionales, es decir como el medio más adecuado para alcanzar uno o varios objetivos.

El Modelo de Decisión de los Regantes Españoles (MODERE)¹ elaborado durante mas de un año y medio por el Ministerio de Medio Ambiente (con la colaboración de varias Universidades y validado por un grupo de expertos de economía agraria) consiste básicamente en una metodología que utiliza la mejor información disponible para explicar las decisiones de los agricultores españoles y para elaborar previsiones sobre los efectos que tendrán los cambios institucionales y la política de agua sobre tales decisiones.

Un buen modelo de simulación debe, en primer lugar, recoger del mejor modo posible las posibilidades mencionadas de elección de los regantes y, en segundo lugar, debe ser capaz de reproducir la decisión observada del agricultor identificando los objetivos que para este son relevantes. Esta tarea de conseguir un modelo de análisis capaz de describir el contexto de elección del regante y de reproducir como mejor decisión la decisión observada, se conoce como calibrado del modelo de análisis.

El segundo objetivo de un modelo consiste en permitir la evaluación de los efectos del cambio de los precios, los rendimientos, la técnica de riego o cualquier variable que se considere relevante. Si el modelo es suficientemente flexible, éste servirá para obtener una previsión sobre el modo en que se ajustarán las decisiones privadas a la nueva situación.

Al representar y reproducir las decisiones de los regantes, el modelo de análisis permitirá saber, por ejemplo, en qué medida los agricultores de un determinado municipio son propensos o adversos al riesgo o si tratan o no de eludir formas

¹ Este trabajo se basa en estudios anteriores de modelos de simulación. Así, podemos encontrar modelos de programación multicriterio (más conocido por sus siglas en inglés MCDM) en Romero y Rehman (1984), Romero et al. (1987), Berbel (1989), Berbel et al. (1991), Rehman y Romero (1993), Sumpsi et al (1993), Berbel y Rodríguez-Ocaña (1998). Dentro de la teoría multiatributo (MAUT) el presente trabajo también se base en los trabajos de Rausser y Yassour (1981) y Delforce y Hardaker (1985). Un artículo general sobre el estado de la cuestión podemos encontrarla en Dyer et al (1992) y una revisión de metodologías en MCDM y MAUT en Hayashi (1999).

complicadas de gestión aunque esto les obligue a aceptar menores márgenes de beneficios.

El modelo aporta información detallada sobre los cultivos, la demanda de agua, el uso de factores productivos, la utilización de agroquímicos, la renta agraria, el empleo, y todas las demás variables que se consideren útiles para evaluar el sector y los efectos de las políticas públicas que puedan afectar dicha actividad.

Desde el punto de vista científico, se trata de un modelo capaz de superar los niveles de rigor exigibles en el actual estado de desarrollo de la investigación en análisis económico. Desde el punto de vista práctico, es una herramienta flexible, de fácil utilización, que aporte resultados que puedan explicarse con facilidad y que puedan ser replicados con completa transparencia.

4.- Otras consideraciones en el análisis de la demanda del agua en la agricultura y en el análisis de resultados.

En la aplicación del modelo y en el análisis de resultados hay que tener en cuenta algunos factores como:

El carácter estratégico del agua en la agricultura:

- La viabilidad de la agricultura en muchas regiones, particularmente del sur de la península, depende de la disponibilidad de facilidades de riego. Por lo tanto, los cambios en los precios del agua y el aumento de los costes de acceso al recurso pueden tener efectos negativos sobre esta actividad que deben considerarse en el diseño de la política hidrológica.
- El mantenimiento de la agricultura se considera importante en algunas regiones para conservar las posibilidades de ingreso de la población en el territorio y para garantizar algunos servicios ambientales que presta esta actividad como la conservación del paisaje, la prevención de la erosión o la preservación del patrimonio rural. Por ese motivo, la política agraria guarda relación con objetivos ambientales que deben ser considerados de una manera explícita para juzgar su importancia.

El carácter local y la amplia variedad de situaciones que se presentan en la agricultura española, por lo que es imposible decir algo relevante sobre el sector a partir de datos agregados ya que:

- Existen diferencias marcadas entre los modelos de agricultura de las distintas regiones españolas y no pueden obtenerse resultados válidos simultáneamente para la agricultura del interior y para la agricultura mediterránea o de las cuencas atlánticas.
- Es necesario recoger características específicas de cada una de las regiones. Entre estas características se cuentan, por ejemplo, la vocación agraria, las ayudas a la producción o al ingreso, la meteorología, la existencia de industrias complementarias, la disponibilidad de tecnologías de riego, etc.
- También es necesario considerar las diferencias entre la agricultura que depende de las ayudas y apoyos públicos, de aquella cuyo desarrollo ha dependido de los incentivos de mercado.

SECCION II METODOLOGÍA DEL MODERE, Formulación del modelo desarrollada por Carlos Mario Gómez, Universidad de Alcalá para el Ministerio de Medio Ambiente²

El método permite revelar las preferencias de los regantes de un modo compatible con un modelo económico subyacente en el que pueden explicarse las decisiones de los regantes como resultados racionales y óptimos. Este procedimiento no exige supuestos restrictivos sobre las preferencias de los regantes (ni utilidad cardinal, ni linealidad).

El método es independiente del número de atributos que se incluyan en la función de utilidad. El único requisito es que la frontera de posibilidades de elección sea convexa en el conjunto de atributos elegidos: es decir, que mejorar en un atributo tenga efectivamente un coste de oportunidad sobre los demás.

Una vez obtenida la función de utilidad se consigue un modelo que reproduce la decisión observada y que permite simular cualquier escenario que se considere relevante y que afecte a los costes de producción, la disponibilidad de recursos, los precios de los productos, la eficiencia o el marco institucional del sector.

Lo primero que debemos definir con precisión es el modo de representar las decisiones de los agricultores. Siguiendo la alternativa tradicional en la literatura entendemos que, en nuestro caso, una decisión consiste en asignar una determinada superficie a cada uno de los cultivos o aprovechamientos posibles. Tal decisión puede representarse entonces a través de un vector de superficies de cultivo. Con el objetivo de estandarizar el vector de decisiones y hacerlo comparable entre localidades se ha preferido representar las superficies como porcentaje del total de la superficie disponible para regadío. Este vector de decisiones puede entonces representarse como:

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n); \quad 0 \leq x_i \leq 1; \quad \sum x_i = 1$$

Las decisiones de cultivo, representadas convenientemente, deben ajustarse a un conjunto de restricciones que delimitan el espacio de elección de los agricultores. Estas restricciones han sido objeto de un análisis detallado con el fin de definirlas con la mayor precisión posible y de incorporarlas en el modelo de análisis. Las restricciones empleadas son las siguientes:

² Con la Colaboración de Carlos Gutierrez y Julio Berbel (Universidad de Córdoba); Jose Antonio Gomez Limon (Univesidad de Palencia); Manuel Pulido (Universidad Politecnica de Valencia); Jose Antonio Criado (Universidad Politecnica de Madrid).

- *Disponibilidad de Agua.* $\sum_i \omega_i x_i \leq W$
- *Disponibilidad de Suelo.* $\sum_i x_i \leq T$
- *Vocación agrícola.* $\sum_i \gamma_i x_i = 0 \mid \gamma_i \in \{0,1\}$
- *Restricciones PAC.* $\eta_i x_i \geq (1 - \beta_i) x_i^o \mid \eta_i \in \{0,1\}; \quad 0 \leq \beta_i \leq 1$
- *Cultivos Permanentes, límite inferior.* $\mu_i x_i \geq (1 - \phi_i) x_i^o \mid \mu_i \in \{0,1\}; \quad 0 \leq \phi_i \leq 1$
- *Cultivos Permanentes, límite superior.* $\mu_i x_i \leq (1 + \phi_i) x_i^o \mid \mu_i \in \{0,1\}; \quad 0 \leq \phi_i \leq 1$
- *Restricciones Agronómicas.* $AX \leq b \mid A \in \mathbb{R}^{m \times n}; \quad X \in \mathbb{R}^n$

En el modelo de análisis se consideran estas restricciones como las más relevantes y, con carácter general, se excluyen otras restricciones posibles. Esto significa que se acepta que los agricultores pueden encontrar trabajadores suficientes, siempre que estén dispuestos a pagar el precio de mercado de la mano de obra y que pueden acceder sin límite a recursos del crédito y a los mercados de productos, maquinaria y bienes intermedios a los precios vigentes en cada uno de esos mercados.

Con los elementos anteriores los agricultores toman la decisión que consideran más conveniente de acuerdo con sus propias preferencias. La cuestión que debemos responder es entonces cuáles son las razones o motivaciones que hacen que la decisión observada sea la más adecuada respetando los criterios de elección del agricultor. Entramos con ello en el análisis de los criterios de elección del agricultor.

Los dos primeros criterios elegidos son el beneficio y la aversión al riesgo. Para ello se pueden usar distintos indicadores que nos midan ambos atributos.

Respecto al primero de los atributos deben considerarse varios aspectos importantes. En primer lugar, cuando se toman las decisiones de distribuir la superficie disponible en unos determinados cultivos, el agricultor no puede anticipar con certeza el precio de mercado ni el rendimiento que obtendrá. Por ese motivo, en realidad la información que utiliza es la expectativa de unos beneficios que dependerán de un conjunto de factores asociados a los precios y los rendimientos. Más que de rentabilidad de las decisiones debemos referirnos a rentabilidad o beneficio esperado; una información que depende de valores históricos y que se debe actualizar año tras año.

En segundo lugar, existen formas diferentes de medir el beneficio financiero o la rentabilidad de las explotaciones agrarias. Dentro de las alternativas que aporta la red contable agraria se encuentran los márgenes neto, estándar así como la renta familiar o el valor añadido. En cualquier caso, a la hora de elegir el indicador adecuado debe tenerse en cuenta que éste se debe referir exclusivamente a los costes y beneficios que dependen de la decisión de cultivo que pretendemos valorar. Por lo tanto, deben excluirse todos los costes fijos, es decir los que dependen de la actividad en general y no de que se cultive esta u otra cosa. Así, por ejemplo, si los servicios de agua no están sometidos a un control volumétrico, la tarifa del agua se convierte en un coste fijo, que no depende de la decisión de cultivo, y el único coste del agua realmente asociado a la decisión que pretendemos evaluar será el coste de aplicación del riego.

Por los motivos anteriores, en el modelo de análisis se utiliza el margen financiero variable promedio por hectárea como el indicador más adecuado de la rentabilidad financiera esperada de las decisiones de los agricultores.

Para su cálculo, se toman promedios de precios y rendimientos anuales nacionales y provinciales respectivamente, a los que se les suma la subvención correspondiente y se detraen todos los costes variables, como el coste variable de la aplicación del agua, los costes directos (semilla, fertilizantes...), el coste de la mano de obra y los costes variables de la maquinaria. Suponiendo una tecnología de coeficientes fijos y rendimientos constantes de escala, el margen bruto estándar esperado de una asignación de cultivos es igual a

$$\pi(x) = \frac{\sum_i \pi_i x_i}{\sum_i x_i}$$

La elección de una combinación de cultivos es muy similar a la de elección de una cartera de valores en la que el problema consiste en elegir la proporción de títulos de bajo riesgo y baja rentabilidad, por ejemplo letras del tesoro o cultivos PAC, y la proporción de valores de alta rentabilidad esperada pero muy volátiles, por ejemplo, acciones u hortalizas frescas. La mayor o menor proporción de un valor o del otro dependerá de la actitud del decisor frente al riesgo.

Existen multitud de modelos de elección de cartera de valores en la literatura en los que se considera el riesgo. Así encontramos el modelo de media-varianza (Markowitz, 1959), modelo "Safety First" (Roy, 1952), modelo de Konno y Yamazaki (1991), y otros muchos.

Aplicado a la agricultura, el modelo "Safety First" ha sido implementado con éxito en Kennedy et al (1974), aunque en este modelo el mínimo riesgo no era un criterio de decisión sino una restricción útil para delimitar el conjunto de soluciones factibles. En programación lineal multicriterio (MCDM) se han empleado ampliamente los modelos "target MOTAD" (Minimization of Total Absolute Deviation; Tauer, 1983) y MOTAD (una comparación de ambos se encuentra en Watts et al, 1984). En modelos multiperiodo, el riesgo futuro también puede introducirse como una tasa de actualización que prime los beneficios corrientes (y más seguros) frente a los rendimientos inciertos futuros (López Baldovín et al, 2005).

En nuestro modelo, el riesgo que asume un agricultor con una decisión de cultivo puede medirse de un modo estándar a través de la desviación típica del margen variable esperado que se obtiene de las series temporales del margen variable de cada hectárea de cada uno de los aprovechamientos posibles. Del mismo modo que la base de datos permite obtener el margen variable esperado, también se puede obtener la varianza del margen asociado a cada cultivo y la matriz de varianzas covarianzas (VCV) del conjunto de cultivos. La desviación típica de una decisión de cultivos es igual a:

$$\sigma(x) = x^T VCV x$$

x^T es la transpuesta del vector de decisiones de cultivos.

De esta forma, y a través de estos dos atributos, los agricultores, en sus decisiones de cultivo, se enfrentan a la posibilidad de elegir entre múltiples combinaciones de beneficio financiero esperado y de riesgo de modo que si se quiere aspirar a un beneficio financiero mayor es necesario aceptar un mayor riesgo y, viceversa, es posible optar por alternativas seguras con poco riesgo siempre que se esté dispuesto a aceptar un menor rendimiento financiero. A diferencia de otros modelos que simplemente dan por hecho que existe una frontera de posibilidades de elección formada por el beneficio financiero esperado y su desviación estándar y que dicha frontera tiene pendiente decreciente y es convexa, el modelo desarrollado reconoce la necesidad de verificar que dicha frontera existe y que tiene la forma esperada.

De acuerdo con lo anterior, la elección del agricultor dependerá de su actitud frente al riesgo. Sólo un agricultor que no sea adverso al riesgo tomará la decisión que aporta el máximo rendimiento financiero esperado y, en cuanto mayor sea el grado de aversión al riesgo, más se alejará de esa solución y se aproximará a las alternativas más seguras de cultivo. En ese sentido son entonces las preferencias de los agricultores las que deben explicar el punto en que finalmente se sitúa el agricultor en su frontera de posibilidades de elección.

Sin embargo, al igual que cuando consideramos solamente la rentabilidad financiera, es probable que la decisión observada de los agricultores no se encuentre sobre la frontera de posibilidades de elección. Esa es la situación que se ilustra en la figura anterior. La decisión del agricultor no sería un óptimo paretiano ya que para el mismo nivel de riesgo, se puede obtener un mayor beneficio y viceversa. La explicación a esto es que puede haber otros atributos de la función objetivo del agricultor que no hemos tenido en cuenta hasta ahora en la especificación de la función objetivo

A medida que añadimos atributos (o criterios privados de decisión) a la función objetivo de los regantes, nos vemos en la necesidad de incluir criterios más cualitativos y difíciles de medir con absoluta precisión.

Este es el caso del criterio que, según varios autores, entraría en tercer lugar en las preferencias de los agricultores (cuando los otros dos resulten insuficientes). Según este tercer criterio los agricultores de un modo comprensible prefieren decisiones de cultivo que resulten fáciles de gestionar y sólo están dispuestos a involucrarse en actividades complejas si esto se ve recompensado con una mayor rentabilidad financiera o con unos beneficios más seguros.

El razonamiento anterior es fácil de aceptar aunque resulta difícil de poner en práctica debido al desafío que supone el diseño de indicadores comprensivos que midan adecuadamente la complejidad de la gestión, un concepto multidimensional. En la literatura se pueden encontrar modelos donde se incluye la mano de obra, el capital circulante y otros (Romero y Rehman, 1984, Romero et al. 1987, Berbel 1989). Una buena revisión de posibles objetivos podemos encontrarla en Patrick and Kliebestein (1980).

Para hacer operativo este criterio, en el presente modelo se ha intentado desarrollar tres indicadores diferenciados de la complejidad de la gestión.

- El trabajo total requerido para poner en práctica una decisión de cultivo y que incluye por tanto el trabajo asalariado y el trabajo familiar.

$$N(x) = \frac{1}{X} \sum_i x_i N_i$$

- El trabajo asalariado necesario para poner en marcha una decisión de cultivo. Debe aclararse que este indicador se refiere a la complejidad de la gestión y no a los costes de producción que obviamente se pretenden minimizar, lo que ya se encuentra incluido en la medición del margen financiero (el primer criterio de decisión).

$$L(x) = \frac{1}{X} \sum_i x_i L_i$$

- La importancia de los costes directos como porcentaje de los costes totales de producción. Estos costes directos incluyen todos los gastos intermedios incluido el coste variable de la maquinaria. Al igual que en el caso anterior lo que interesa no es el valor absoluto de estos costes sino su importancia relativa como un indicador de las complicaciones de gestionar una decisión de cultivo.

$$c(x) = \frac{\sum_i x_i CD_i}{\sum_i CV_i}$$

Obviamente, antes de aceptar cualquiera de estos indicadores como un criterio para explicar las decisiones de los regantes deben superarse algunos requisitos:

- En primer lugar, es necesario demostrar que existe la relación esperada entre tal indicador y los demás. Es decir, que la alternativa de una gestión menos complicada tiene un coste de oportunidad en términos de menor rendimiento financiero o, alternativamente, de mayor riesgo. Este análisis sólo puede hacerse construyendo la frontera de posibilidades de elección (lo que puede resolverse fácilmente con los medios informáticos disponibles, siempre que haya un abanico suficiente de posibilidades de elección). Esto es, que la Relación Marginal de Transformación (RMS) entre dos atributos, es decir la pendiente de la frontera de posibilidades de elección sobre un plano debe ser negativa. Alternativamente, la mejora respecto a un atributo positivo (menos complejidad de gestión) debe tener un coste de oportunidad (menos rentabilidad o mayor riesgo).
- En segundo lugar, el indicador o los indicadores de la complejidad de gestión que se incluyan en el modelo deben contribuir a explicar la decisión observada del agricultor. Es decir, deben mejorar la capacidad del modelo para obtener la solución observada como la mejor alternativa del agricultor de acuerdo con sus propios criterios y con la importancia que el agricultor les atribuya. En otras palabras, una vez considerado el atributo en cuestión el efecto deberá ser una mejor aproximación de la solución observada a la frontera de posibilidades de elección, como puede verse en la figura 2.

Idealmente, el análisis anterior termina en el momento en que se han incorporado todos los criterios potenciales con que los agricultores evalúan la bondad de sus decisiones de cultivo. En ese momento se dispondrá también de una representación matemática de la frontera de posibilidades de elección de los agricultores, que incluye todas las combinaciones de los criterios relevantes (rentabilidad, riesgo evitado, trabajo evitado, trabajo asalariado evitado u costes directos evitados), que pueden alcanzarse mediante una decisión de cultivo que utilice completamente los recursos disponibles con la tecnología existente y respetando las restricciones institucionales, agronómicas y de vocación del suelo.

El agricultor elige una combinación de criterios o atributos de su función de bienestar dentro de la frontera de posibilidades de elección. A través de esa elección, el agricultor está revelando la importancia relativa de cada uno de los atributos de su decisión de cultivo. Del análisis anterior se pueden entonces deducir todos los elementos necesarios para obtener la función de utilidad del regante. Simplemente se trata de obtener una función de utilidad que convierta la decisión observada en la solución óptima de un problema de maximización de bienestar sujeto a todas las restricciones del problema de elección.

El problema se reduce a encontrar una función de utilidad que en el punto de equilibrio iguale la Relación Marginal de Sustitución a la Relación Marginal de Transformación. Es decir, una función de utilidad que tenga en la solución observada el mismo conjunto de derivadas parciales que las pendientes de la frontera de posibilidades de elección. El problema tiene una solución inmediata que viene garantizada por la convexidad de la frontera de posibilidades de elección, la cual se ha comprobado a cada paso durante su construcción.

Como se muestra en la figura anterior, cuando enfrentamos margen bruto y riesgo, a través de su decisión el regante revela su Disposición Marginal a Pagar por evitar el riesgo, la tangente del ángulo $\beta_{\pi,\sigma}$, es igual a la Relación Marginal de Transformación entre el margen bruto y el riesgo (de acuerdo con la Frontera de posibilidades de elección) y también a la Relación Marginal de Sustitución entre esos dos atributos (de acuerdo con las preferencias implícitas del regante).

La función de utilidad del agricultor empleada ha sido una Cobb-Douglas (Cobb and Douglas, 1928), cuya forma para tres atributos para simplificar el proceso es

$$U(\pi, \sigma_e, L_e) = \pi^{\alpha_1} \sigma_e^{\alpha_2} L_e^{\alpha_3} \quad \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$$

En la literatura podemos encontrar algunos precedentes que tratan de modelizar en agricultura utilizando funciones de utilidad coherentes con la teoría económica, que no asuma una utilidad cardinal ni la linealidad de la misma. Los trabajos más actuales podemos encontrarlos en Rausser y Yassour (1981) y Delforce y Hardaker (1985). Sin embargo, estos autores encontraron problemas a la hora de desarrollar sus trabajos por ser necesaria una herramienta de optimización potente con la que no se contaba en la época. Gracias a la evolución de la informática y a paquetes de optimización potentes que existen hoy día³, ha sido posible desarrollar por completo esta metodología.

La función de utilidad Cobb-Douglas presenta varias ventajas. Cumple las condiciones de Inada que junto con una Frontera de Posibilidades de Elección convexa, garantizan la existencia de un óptimo global. Al ser cada uno de los exponentes α_1 , α_2 y α_3 menor a la unidad, dicha especificación resulta consistente con el postulado neoclásico de productividad marginal decreciente de los factores. Tales exponentes además pueden interpretarse como pesos o indicadores de la importancia relativa de cada uno de los atributos en las preferencias del regante. Una temprana discusión de este último punto puede encontrarse en Reder (1943), Bronfenbrenner (1944) y Phelps Brown (1957).

Una segunda ventaja de la especificación Cobb-Douglas reside en que al tratarse de una forma multiplicativa sencilla, una simple transformación logarítmica proporciona una función lineal. En efecto, la función arriba descrita representa el mismo orden de preferencias que:

$$V(\pi, \sigma_e, L_e) = \ln(U(.)) = \alpha_1 \ln(\pi) + \alpha_2 \ln(\sigma_e) + \alpha_3 \ln(L_e)$$

Con la ventaja de que no es necesario asumir preferencias lineales, ni utilidades marginales constantes. Derivando la función $U(\pi, \sigma_e, L_e)$ obtenemos las parciales

³ Para llevar a cabo la programación se ha usado el software GAMS (General Algebraic Modelling System). Como ejemplo, el modelo piloto llevado a cabo en Albacete lleva a cabo 345 optimizaciones, cada una de las cuales tiene 156 variables y 257 restricciones con 771 elementos Jacobianos, 53 de los cuales son no lineales. El Hessiano de la función objetivo orlado con los precios sombra de las restricciones tiene 53 elementos en la diagonal, 1378 elementos por debajo de la diagonal y 53 variables no lineales.

$$\begin{array}{ccc}
RMS_{\pi, \sigma_e} = -\frac{\partial U / \partial \sigma_e}{\partial U / \partial \pi} & \longrightarrow & RMS_{\pi, \sigma_e} = -\frac{\alpha_2}{\alpha_1} \frac{\pi}{\sigma_e} = -\beta_1 \\
RMS_{\pi, L_e} = -\frac{\partial U / \partial L_e}{\partial U / \partial \pi} & \longrightarrow & RMS_{\pi, L_e} = -\frac{\alpha_3}{\alpha_1} \frac{\pi}{L_e} = -\beta_2 \\
RMS_{\sigma_e, L_e} = -\frac{\partial U / \partial L_e}{\partial U / \partial \sigma_e} & \longrightarrow & RMS_{\sigma_e, L_e} = -\frac{\alpha_3}{\alpha_2} \frac{\sigma_e}{L_e} = -\beta_3
\end{array}$$

β_1 , β_2 y β_3 son respectivamente las pendientes de las tangentes a la frontera de posibilidades de elección y a la curva de indiferencia entre $\pi - \sigma_e$, $\pi - L_e$ y $\sigma_e - L_e$. Finalmente se deduce

$$\alpha_1 = \frac{1}{\left(1 + \beta_1 \frac{\sigma_e}{\pi} + \beta_2 \frac{L_e}{\pi}\right)}; \quad \alpha_2 = \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{\beta_1} \frac{\pi}{\sigma_e} + \beta_3 \frac{L_e}{\sigma_e}\right)} \quad \text{y} \quad \alpha_3 = \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{\beta_2} \frac{\pi}{L_e} + \frac{1}{\beta_3} \frac{\sigma_e}{L_e}\right)}$$

Veamos esta demostración punto por punto:

La revelación de preferencias consiste en el calibrado de los parámetros de la función de utilidad

$$U = F(z) \quad z \in \mathfrak{R}^{+^k}$$

$$\frac{\partial U}{\partial z_i} \geq 0 \quad \forall i \in \{1, \dots, k\}$$

El Problema del Agente:

$$\text{Max } U(z)$$

Sujeto a: $z \in G(z)$, siendo $G(z)$ la frontera de posibilidades de elección.

La cesta de atributos relevantes se encuentra sobre la Frontera de Posibilidades de Elección (FPE) ya que esta es convexa. Por lo tanto, este problema es equivalente a:

$$\text{Max } U(z)$$

Sujeto a: $Z = I(x)$, $x \in H(x)$

$$\text{Max } U(I(x))$$

Sujeto a $x \in H(x)$

Las condiciones de equilibrio de este problema de optimización pueden expresarse como:

$$RMS_{j,i} = -\frac{\partial U / \partial z_i}{\partial U / \partial z_j} = -\frac{\partial G / \partial z_i}{\partial G / \partial z_j} = RMT_{j,i}$$

La $RMS_{j,i}$ depende de las preferencias y define la demanda de atributos. Estas $RMS_{j,i}$ se pueden definir analíticamente ya que “conocemos” o suponemos una forma funcional de la función de utilidad.

La $RMT_{j,i}$ depende de la tecnología, los recursos disponibles y define la oferta de atributos. Al no haber una función explícita de la FPE ($G(z)$) estas $RMT_{j,i}$ sólo pueden obtenerse numéricamente mediante el cálculo de las derivadas parciales de la FPE mediante la solución de problemas parciales de optimización en el entorno de la solución observada.

Supuestos sobre preferencias:

Cobb-Douglas homotética de grado 1.

$$U(z) = \prod_{i=1}^K z_i^{\alpha_i} ; \quad \sum_{i=1}^K \alpha_i = 1$$

Los exponentes α_i reflejan los pesos, o la importancia relativa del atributo Z_i en el bienestar del agricultor.

$$\alpha_i = \frac{\partial U}{\partial z_i} \left(\frac{z_i}{U(z)} \right)$$

Las derivadas parciales:

$$\frac{\partial U}{\partial z_i} = \alpha_i \frac{U(z)}{z_i}$$

Por lo tanto las Relaciones Marginales de Sustitución

$$RMS_{j,i} = -\frac{\partial U / \partial z_i}{\partial U / \partial z_j} = -\frac{\alpha_i \frac{U(z)}{z_i}}{\alpha_j \frac{U(z)}{z_j}} = -\frac{\alpha_i}{\alpha_j} \frac{z_j}{z_i}$$

Las $RMT_{j,i}$ se obtienen a partir del vector de atributos observados

$$\hat{Z} = (\hat{z}_1, \dots, \hat{z}_i, \dots, \hat{z}_k)$$

Mediante la solución de k problemas de optimización del tipo:

$$\bar{Z}_i = \text{Max}_{z_i}$$

Sujeto a $z \in G(z)$

$$z_j = \hat{z}_j$$

$$\forall j \neq i \quad j = \{1, \dots, k\}$$

Se obtiene el vector de Máximos (superóptimo)

$$\bar{Z} = (\bar{z}_1, \dots, \bar{z}_i, \dots, \bar{z}_k)$$

Puede demostrarse que: $RMT_{j,i} = \frac{\bar{z}_j - \hat{z}_j}{\hat{z}_i - \bar{z}_i} < 0$

$$\text{o: } RMT_{j,i} = - \frac{\bar{z}_j - \hat{z}_j}{\bar{z}_i - \hat{z}_i}$$

$$-RMT_{j,i} = \begin{pmatrix} 1 & \dots & \dots & \frac{\bar{z}_1 - \hat{z}_1}{\bar{z}_k - \hat{z}_k} \\ \frac{\bar{z}_2 - \hat{z}_2}{\bar{z}_1 - \hat{z}_1} & 1 & & \\ \dots & & \dots & \\ \frac{\bar{z}_k - \hat{z}_k}{\bar{z}_1 - \hat{z}_1} & & & 1 \end{pmatrix}$$

$$A = (\bar{z}_1, \hat{z}_2, \hat{z}_3) \quad \frac{\Delta z_2}{\Delta z_1} = RMT_{2,1} = \frac{\bar{z}_2 - \hat{z}_2}{\hat{z}_1 - \bar{z}_1} < 0$$

$$B = (\hat{z}_1, \bar{z}_2, \hat{z}_3) \quad \frac{\Delta z_3}{\Delta z_2} = RMT_{3,2} = \frac{\bar{z}_3 - \hat{z}_3}{\hat{z}_2 - \bar{z}_2} < 0$$

$$C = (\hat{z}_1, \hat{z}_2, \bar{z}_3) \quad \frac{\Delta z_3}{\Delta z_1} = RMT_{3,1} = \frac{\bar{z}_3 - \hat{z}_3}{\hat{z}_1 - \bar{z}_1} < 0$$

como: $-RMS_{j,i} = -RMT_{j,i}$

$$\frac{\alpha_i}{\alpha_j} \frac{z_j}{z_i} = \frac{\bar{z}_j - \hat{z}_j}{\hat{z}_i - \bar{z}_i}$$

Estas condiciones pueden utilizarse para obtener los parámetros α de la Función de Utilidad. Sin embargo, esto sólo puede hacerse en un punto (vector de atributos que se encuentre sobre la Frontera de Posibilidades. (en A, B o C)

Tomemos un atributo cualquiera j.

Obtengamos el vector $(\hat{z}_1, \hat{z}_2, \hat{z}_{j-1}, \bar{z}_j, \dots, \hat{z}_k)$

Entonces la condición $\frac{\alpha_i}{\alpha_j} \frac{z_j}{z_i} = \frac{\bar{z}_j - \hat{z}_j}{\hat{z}_i - \bar{z}_i}$ implica:

$$\alpha_i^j = \frac{\bar{z}_j - \hat{z}_j}{\bar{z}_j} \frac{\hat{z}_i}{\bar{z}_i - \hat{z}_i} \alpha_j$$

$$\text{como: } \sum_{i=1}^K \alpha_i^j = 1 \quad \sum_{i \neq j} \left(\frac{\bar{z}_j - \hat{z}_j}{\bar{z}_j} \frac{\hat{z}_i}{\bar{z}_i - \hat{z}_i} \alpha_j \right) + \alpha_j = 1$$

$$\alpha_j \frac{\bar{z}_j - \hat{z}_j}{\bar{z}_j} \sum_{i \neq j} \frac{\hat{z}_i}{\bar{z}_i - \hat{z}_i} + \alpha_j = 1$$

$$\alpha_j^i = \frac{1}{1 + \left(1 - \frac{\hat{z}_j}{\bar{z}_j} \right) \sum_{i \neq j} \left(\frac{1}{\frac{\bar{z}_i}{\hat{z}_i} - 1} \right)}$$

$$\alpha_i^j = \left(\left(1 - \frac{\hat{z}_j}{\bar{z}_j} \right) / \left(\frac{\bar{z}_i}{\hat{z}_i} - 1 \right) \right) \alpha_j$$

El procedimiento se puede repetir k veces (es como si calibrásemos los parámetros α en los puntos A(j=1) B(j=2) y C(j=3)).

Tales parámetros no deberían ser muy distintos entre sí. Finalmente los valores pueden calcularse como:

$$\alpha_i = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \alpha_i^j$$

Con esto tendremos completamente calibrado el modelo.

Referencias:

- Berbel, J. (1989). Analysis of protected cropping: an application of multiobjective programming techniques to Spanish horticulture. *European Review of Agricultural Economics*, 1989, vol. 16, issue 2, pages 203-16.
- Berbel, J., Gallego, J., Sagues, H. (1991). Marketing goals vs. business profitability: An interactive multiple criteria decision-making approach, *Agribusiness* 7 (6) 537-549.
- Berbel, J., Rodríguez-Ocaña, A. (1998). An MCDM approach to production analysis: An application to irrigated farms in southern Spain, *European Journal of Operational Research* 107 (1) 108-118.
- Bronfenbrenner, M. (1944). Production functions: Cobb-Douglas, interfirm, intrafirm. *Econometrica*.
- Cobb, C.W. and Douglas, P.H. (1928). A Theory of Production. *American Economic Review*, 18 (Supplement), 139-165.
- Delforce, R.J., Hardaker, J.B. (1985). An experiment in multiattribute utility theory, *Australian Journal of Agricultural Economics* 29 (3) (1985) 179-198.
- Dyer, J.S., Fishburn, P.C., Steuer, R.E., Wallenius, J., Zionts, S. (1992). Multiple Criteria Decision Making, Multiattribute Utility Theory: The Next Ten Years. *Management Science*, Vol. 38, No. 5, pp. 645-654.
- Hayashi, K. (1999). Multicriteria analysis for agricultural resource management: A critical survey and future perspectives. *European Journal of Operational Research*, 122, pp 486-500.
- López Baldovín, M.J.; Gutiérrez, C. y Berbel, J. (2005). Herramienta para el análisis de escenarios de política agraria y ambiental en el regadío del Valle del Guadalquivir. *Revista Española de Estudios Agrosociales y Pesqueros*, nº 205: 65-98; ISSN: 1575-1198.
- Patrick, G.F. and Kliebestein, J.B. (1980). Multiple goals in farm firm decision making: A social science perspective. *Purdue Univ. Station Bulletin* n. 306.
- Reder, M.W. (1943). An alternative interpretation of the Cobb-Douglas function. *Econometrica*.
- Phelps Brown, E.H. (1957). The meaning of the fitted Cobb-Douglas function. *Quarterly Journal of Economics*.
- Rausser, G.C., Yassour, J. (1981). Multiattribute utility analysis: The case of Filipino rice policy, *American Journal of Agricultural Economics* 63 (4) 484-494.
- Rehman, T., Romero, C. (1993). The application of the MCDM paradigm to the management of agricultural systems: Some basic considerations, *Agricultural Systems* 41 (3) 239-255.
- Romero, C., Rehman, T. (1984). Goal programming and multiple criteria decision-making in farm planning: An expository analysis, *Journal of Agricultural Economics* 35 (2) 177-190.
- Romero, C., Amador, F., Barco, A. (1987). Multiple Objectives in Agricultural Planning: A Compromise Programming Application. *American Journal of Agricultural Economics*, Vol. 69, No. 1, pp. 78-86.
- Tauer, L.M. 1983. Target MOTAD. *American Journal of Agricultural Economics* 65: 606-10.
- Watts, M.J., L. Held and G. Helmers. 1984. A comparison of target-MOTAD to MOTAD. *Canadian Journal of Agricultural Economics* 32: 175-85.

