

Construcción participativa de un modelo de gestión de la explotación agrícola para el apoyo a la toma de decisión colectiva.

Aplicación al caso de la cuenca Aveyron-Lère

GEMA CARMONA (*)

PHILIPPE LE GRUSSE Y MARJORIE LE BARS (**)

HATEM BELHOUCLETTE (***)

JEAN MARIE ATTONATY (****)

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto de la investigación

El respeto al medioambiente, en especial en lo referente al uso de los recursos hídricos, constituye un importante objeto de regulación a nivel nacional y europeo. Respecto al uso del agua, se han dictado varias directivas entre 1992 y 2001, cuya puesta en marcha se debe efectuar a nivel regional y a nivel local mediante la elaboración de reglas resultantes de negociaciones entre los grupos de interés implicados. Estas legislaciones resultan necesarias para conseguir los niveles de calidad medioambiental demandados hoy en día (Falconer and Hodge, 2001).

La sostenibilidad es un concepto que comprende múltiples aspectos y objetivos de diferentes grupos de interés. El análisis de la sostenibilidad económica y medioambiental de los sistemas de cultivo implica necesariamente la creación de indicadores ecológicos (tasa de nitrato en el suelo, lixiviación, erosión...), agronómicos a través de funciones de producción (irrigación, fertilización, tratamientos fitosanitarios...) y económicos (margen del agricultor...) (Just and Antle, 1990). Sin embargo, dada la complejidad del sistema, la utilización

(*) *Universidad Politécnica de Madrid.*

(**) *Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier.*

(***) *INRA-Agro M. UMR SYSTEM de Montpellier.*

(****) *INRA Station d'économie rurale de Grignon.*

de estos indicadores implica la creación de una función, generalmente lineal, que ligue la producción y el medio ambiente, lo que constituye un límite importante para los métodos clásicos basados en la econometría (Antle and Stoorvogel, 2001). Por esta razón, la utilización de modelos bioeconómicos que integran datos agronómicos y económicos es cada vez más frecuente en la construcción de herramientas de negociación y de apoyo a toma de decisiones que tocan a la vez aspectos económicos y medioambientales (Folz *et al.*, 1995; Barbier et Bergeron, 1999, Flichman, 1997).

La principal meta de nuestro estudio ha sido desarrollar una metodología que incluye modelos bio-económicos contruidos con la participación de los actores locales y que permite el análisis de la sostenibilidad de las explotaciones (Siebenhüner and Volker, 2005). Existe una gama de productos disponibles para los gestores agrícolas diseñados para permitirles gestionar los estados de varios ambientes a diferentes escalas de tiempo: registros técnicos por regiones, mallas multicriterio para ayudar a la toma de decisiones y sistemas expertos. El desarrollo de tales productos pone en juego métodos de investigación tales como encuestas, experimentación y modelización (Cretenet, 1995).

En el contexto de la toma de decisión, los principales responsables hablan con frecuencia de «solución óptima». Ahora bien, los instrumentos de cálculo económico utilizados han evolucionado en gran medida y la voluntad de encontrar la solución óptima maximizando la utilidad colectiva ha dejado lugar a aproximaciones menos ambiciosas basadas en técnicas de simulación más o menos sofisticadas. Varios estudios han tratado de describir y analizar los métodos participativos (Mendoza y Prabhu, 2005, Rauschmayer y Risse, 2005), los cuales se han considerado el enfoque más adecuado y efectivo para analizar la sostenibilidad agrícola (Mickwitz *et al.*, 2005; Siebenhüner y Volker, 2005). Estos métodos proporcionan papeles más activos a los actores en el proceso de elaboración del plan de gestión, y en la toma de decisiones sobre las estrategias de gestión y su implementación (Hagggar *et al.*, 2001; Kuntashula and Mafongoya, 2005).

La principal crítica a los métodos participativos se basa en su orientación cualitativa y su aparente falta de rigor, estructura o procedimiento sistemático para el análisis e interpretación de los insumos (Mendoza and Prabhu, 2005). Estos métodos se vuelven más difíciles de analizar e interpretar cuando se estudian diferentes variables medioambientales, sociales y económicas a diversas escalas. En general, se trata de estudios de interés puramente ecológico cuando se desarrollan a escala de la parcela, o de interés puramente económi-

co cuando se analizan a escala de la explotación o de la región (Pacini *et al.*, 2001). La segunda limitación importante de los métodos participativos es que existen pocas herramientas que puedan utilizar conjuntamente investigadores y agricultores para diagnosticar problemas y desarrollar escenarios (Okali *et al.*, 1994).

1.2. Objetivos de la investigación

El caso de la cuenca del Aveyron-Lère constituye un claro ejemplo de conflicto por el uso de los recursos hídricos y por la contaminación nitrúca. Un conjunto de grupos de interés (actores locales, representantes institucionales) con puntos de vista diferentes intentan encontrar una solución para la distribución de los recursos hídricos y para el mantenimiento de la calidad del agua. En el marco de una «Acción Científica Estructurante» INRA-CEMAGREF, se ha elegido esta cuenca como sitio de experimentación (1). En este contexto, nuestro **objetivo** ha sido analizar los sistemas de cultivo existentes en la cuenca Aveyron-Lère para establecer los efectos que los distintos modos de gestión de la irrigación y de la fertilización nitrogenada tienen sobre el medioambiente y sobre los márgenes obtenidos a nivel de explotación y a nivel regional. Para ello, el análisis tiene en cuenta la variabilidad climática (precipitación irregular a lo largo de las estaciones y de los años) y es validado a escala de las explotaciones representativas y del conjunto de la cuenca. Una vez modelizado el sistema agrícola de la cuenca y comprendidas las relaciones entre los modos de gestión y los indicadores considerados, vamos a proponer cambios con el objetivo de mejorar la gestión de los recursos hídricos a nivel del conjunto de la cuenca.

En este documento presentamos las diferentes **etapas** llevadas a cabo en la construcción del modelo regional: (i) definición y validación de los datos de base, (ii) elaboración de una tipología de las explotaciones de la zona de estudio, (iii) generación de datos no observados a partir de un modelo biofísico, (iv) construcción de un modelo regional a partir de un simulador agro-económico, (v) simulación de escenarios posibles. Este procedimiento nos permite obtener un conjunto de datos técnicos y económicos para 1) todos los cultivos, 2) el conjunto de explotaciones a escala individual y regional. Esos datos se introducen en el modelo agro-económico

(1) Informe de estado (2000) para la Acción Científica Estructurante AQUAE (INRA-CEMAGREF-IAMM), descargable en: http://www.wdisc.clermont.cemagref.fr/Labo/activite_recherche/projects/Projects_en_cours/ASSAQUAE/ASSAQUAE.htm

que sirve al mismo tiempo de base de datos y de simulador, a nivel de la explotación agrícola y del conjunto de las explotaciones de la zona (Carmona, 2004).

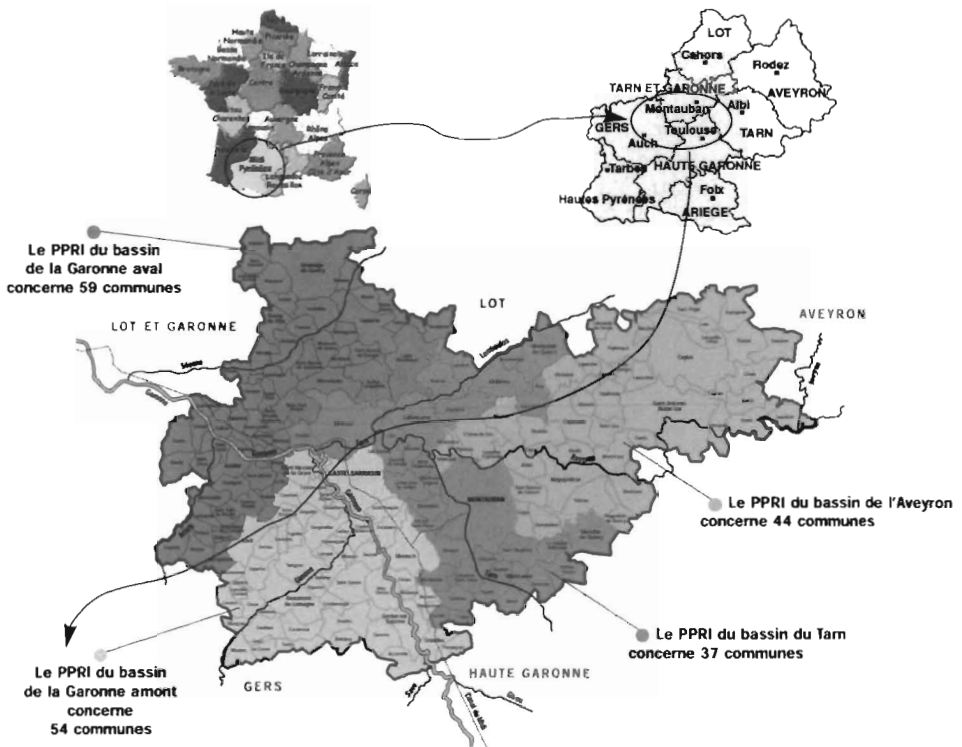
2. LA ZONA DE ESTUDIO, HERRAMIENTAS Y MÉTODOS

2.1. Presentación de la zona de estudio

La cuenca del Aveyron-Lère está situada en el departamento de Tarn et Garonne, en la región de Midi-Pyrénées (Francia).

Mapa 1

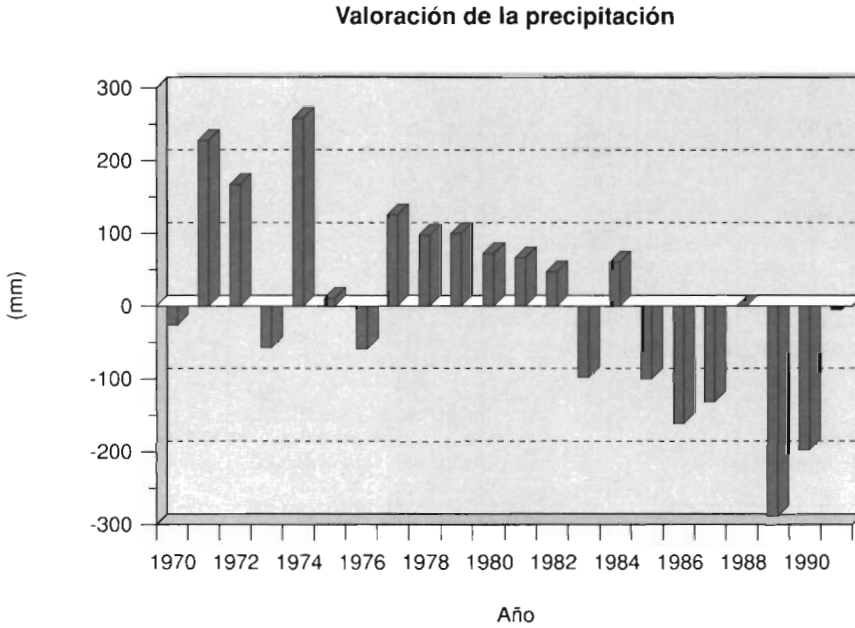
Mapas de situación de la región Tarn et Garonne



El clima de la región se caracteriza por una gran variabilidad interanual de la precipitación, lo que ha provocado un desarrollo importante de la irrigación. Para una serie de 22 años (1970-1991), se ha hallado una media de precipitaciones de 685 mm, con una desviación típica de 136 mm. El siguiente gráfico representa, para dicha

serie de años, la variación de la precipitación anual con respecto a la precipitación media anual:

Gráfico 1



La zona presenta un relieve variado y tres tipos de suelos:

- «**Terrefort**»: suelos con textura arcilloso-calcárea más o menos compactas, sensibles a la erosión y más aptas para árboles frutales y cultivos extensivos (Revel, 1982).
- «**Alluvions**»: suelos de textura arenoso-limosa, profundas, permeables, fáciles de trabajar pero que tienen una baja capacidad de retención (INRA, 1989).
- «**Boulbènes**»: suelos de textura arcillo-limosa. Constituyen las antiguas terrazas del Aveyron y se caracterizan por un suelo pobre en materia orgánica con una baja capacidad de retención de agua (INRA, 1989).

Todas estas características nos han llevado a una división de la cuenca en 5 regiones naturales. Cada una de ellas tendrá su tipo de suelo y su disponibilidad de agua, y, como consecuencia, sistemas de cultivos diferentes:

Cuadro 1

**CARACTERÍSTICAS DE LAS CINCO ZONAS NATURALES
EN LAS QUE SE DIVIDE LA REGIÓN DE ESTUDIO**

Zonas	Suelos	Capacidad retención	Irrigación	Cultivos principales
1. Causses (NE)	Terrefort	Alta	Existencia de cultivos de regadío	Cultivos forrajeros y ganadería
2. Quercy Blanc: lagos	Terrefort	Alta	Lagos alimentados por aguas de escorrentía o de fuentes. Numerosas presas	Frutales y cultivos extensivos
3. Valles de Aveyron y Lère	Alluvions	Media	Muy desarrollada. Aguas superficiales; bombeos directamente del río o asoc. regantes	Producción de semillas, forrajeros y frutales
4. Boulbènes: ríos y grandes lagos	Boulbènes	Baja	Bombeos del Aveyron, Gouyre, Tordre y Ganiol, a través de asociac. regantes	Cultivos extensivos
5. Quercy Vert: grandes lagos	Terrefort	Alta	Muy desarrollada a través de asoc. Regantes del Gouyre, Tordre et Ganiol, y presas	Cultivos extensivos y forrajeros

La superficie media de las explotaciones agrícolas era de 30 ha en 1997, presentando una tendencia a la disminución del número de explotaciones y al aumento de su tamaño (AGRESTE, 2002). En cuanto a las actividades productivas, la heterogeneidad de los suelos de la zona conduce a una variabilidad de potencialidades agrícolas y a una diversidad de cultivos: cereales, prados, producciones hortícolas al aire libre y frutales, viñas y ganadería. La tendencia observada en la región es un aumento de la especialización en las producciones frutales y cerealistas. La superficie de riego de la región aumenta regularmente; dicha superficie representaba en 1997 el 35 por ciento de la SAU (superficie agrícola útil), con una superficie media regable por explotación de 18,7 ha. La superficie de riego de esta zona se reparte entre el maíz para semilla y para ensilado (gran consumidor, que representa él solo cerca de 2/3 partes de la superficie de riego), el sorgo, la soja, el girasol, los árboles frutales y los hortícolas al aire libre (Informe de actividades del contrato fluvial: AQUALIS, 1997 a y b).

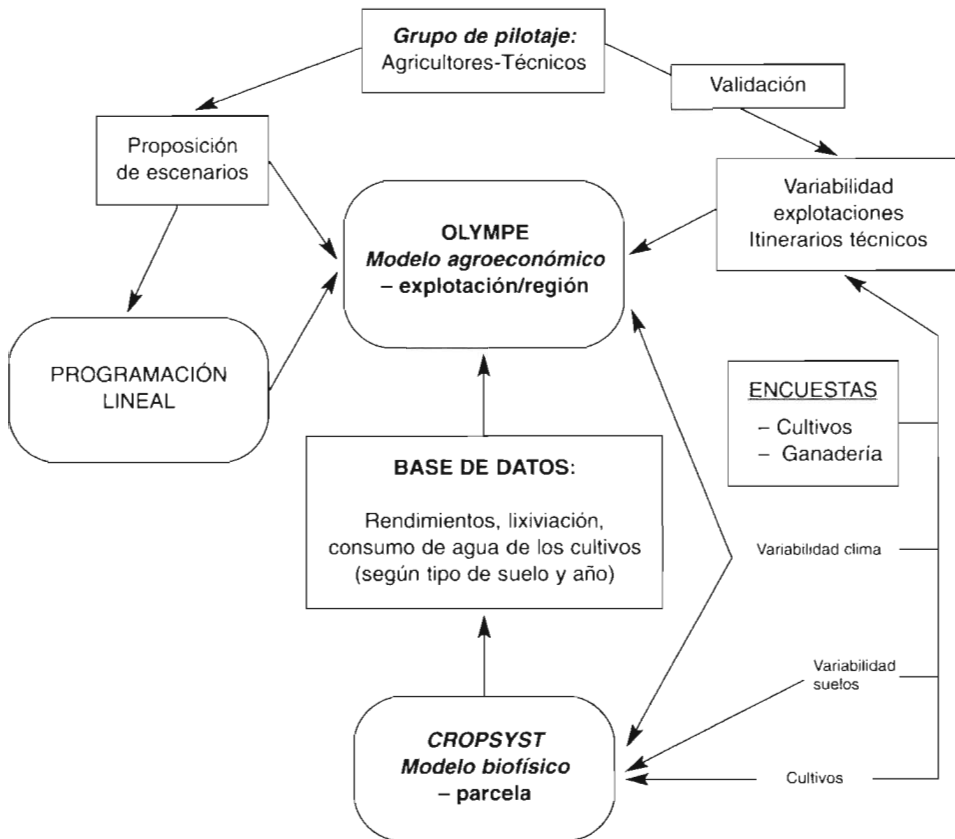
2.2. Metodología

Para construir un marco de negociación sobre la elección de las técnicas relacionadas con el consumo de agua y la utilización del nitró-

geno, es necesario evaluar el impacto de las alternativas posibles y buscar soluciones negociables (Attonaty y Le Grusse, 1994). Esas alternativas posibles se establecen con la ayuda de modelos bioeconómicos que representan el funcionamiento de las explotaciones y de los cultivos (figura 1).

Figura 1

Procedimiento de construcción del modelo



Hemos optado por la utilización de un programa de simulación agroeconómica (Olympe) capaz de calcular para una explotación el margen del agricultor, el agua consumida y las cantidades totales de nitratos lixiviados. Este cálculo se debe hacer a la escala de las explotaciones representativas de la cuenca para ser después extrapolado al conjunto de la cuenca. La caracterización de la explotación se debe

hacer a dos niveles (Attonaty y Soler, 1992): 1) Primeramente, desde el *punto de vista de la estructura* (tamaño, cultivos, itinerarios técnicos, precios...). Estas informaciones se obtendrán principalmente a partir de las declaraciones de cultivo y de las fichas de cultivo proporcionadas por el grupo de pilotaje. 2) Después, desde el punto de vista de los *procesos de funcionamiento* a escala de la parcela. Se trata de establecer para cada tipo de cultivo una función de producción que relacione la fertilización nitrogenada y la irrigación con las cantidades de nitrato lixiviadas y el rendimiento del cultivo. Estas funciones se establecerán por tipo de suelo y de año climático.

El establecimiento de esta **base de datos** supone que dispongamos de un **modelo de cultivos** (CropSyst) que tiene las siguientes características: es capaz de reproducir el funcionamiento del sistema suelo-planta a la escala de la parcela con el objeto de establecer curvas de respuesta del cultivo (rendimientos y lixiviación de nitrato) al agua y al nitrógeno, para cada tipo de suelo y cada tipo de año climático.

En la última parte de nuestro trabajo, propondremos nuevos modos de gestión mejor adaptados a las restricciones de agua y lixiviación que afectan a la cuenca. Simularemos dos tipos de soluciones: 1) A través de la base de datos creada con CropSyst, buscaremos el nivel óptimo de insumos (agua y nitrógeno) que se debe aplicar a los cultivos. 2) Un segundo escenario se basará en la redistribución de las superficies de los cultivos en la zona, sin cambiar las técnicas aplicadas para cada cultivo. Para este escenario utilizaremos un modelo de programación lineal Excel, capaz de proponernos la elección de alternativas que proporcionan los márgenes óptimos respetando las limitaciones de consumo de agua y de lixiviación.

2.3. Etapas en la construcción del modelo regional

El procedimiento consta de las siguientes fases (Le Grusse, 2001):

– Obtención de los datos de partida.

Se han recogido en primer lugar los documentos de los estudios preliminares que sirvieron a la elaboración del contrato fluvial del bajo Aveyron-Lère y que contienen información sobre las características físicas del hidrosistema, sobre los usos del agua, así como una síntesis de los objetivos y las vías de avance tal y como se identificaron en un taller prospectivo que reunió a 70 implicados en la gestión de la cuenca (políticos, administrativos, colectividades, asociaciones...). Asimismo, se han utilizado las declaraciones de cultivos del año 2000 (fichas de explotación detalladas de 1.700 explotaciones de la zona)

y las fichas de explotación por cultivo, tipo de suelo y tipo de año climático que fueron elaboradas por el grupo de pilotaje.

- Elaboración de una tipología de explotaciones. El elevado número de explotaciones (1.700) obligó a la elaboración de una tipología mediante técnicas de análisis de datos y de clasificación. Se consideraron: 1) 5 zonas (las 5 regiones naturales en que se divide la cuenca, con sus tipos de suelo diferentes, que determinan rendimientos y tasas de contaminación diferentes); 2) 20 sistemas de producción (clases); 3) 5 niveles de tamaño. Para cada combinación clase-tamaño-zona, hemos tomado como explotación representativa aquella cuya superficie se aproxima más a la media del grupo. El número de combinaciones posibles es $N.^{\circ}$ clases x $N.^{\circ}$ niveles tamaño x $N.^{\circ}$ Zonas = 500 grupos teóricos. Eliminando los grupos vacíos, hemos obtenido finalmente 296 explotaciones representativas que caracterizan los tipos diferentes de explotaciones que pueden aparecer en la cuenca.

Para la construcción del modelo de cuenca, se han introducido los datos detallados de esas 296 explotaciones, ponderándolos después por un coeficiente igual al número total de explotaciones al que cada una representa. Este trabajo de construcción de la tipología, de elección de las zonas y de estratificación se desarrolló con la colaboración del grupo de pilotaje, durante reuniones que se llevaron a cabo mensualmente durante un año. Este procedimiento nos permitió estructurar la información, pero también constituyó un factor de aprendizaje del grupo de pilotaje, que aceptó el modelo como representación de su realidad.

- Generación de datos no observados con CropSyst, un modelo de simulación de cultivos que ha permitido estimar los datos que faltaban relativos al efecto de las operaciones de cultivo sobre la cosecha y sobre el medio ambiente, tales como la cantidad de nitrato lixiviado. Así, se ha creado a partir de CropSyst una base de datos sobre los rendimientos y las pérdidas de nitratos para cada cultivo para los distintos años climáticos y en los tres suelos presentes en la cuenca, datos que serán introducidos después a nivel del modelo económico.
- Construcción de un modelo de simulación agroeconómico capaz de representar la agricultura de la cuenca mediante la agregación de las explotaciones tipo por nivel de tamaño, tipo de suelo y por zona geográfica. Este modelo se elaboró con el programa Olympe, el cual nos ha permitido probar diferentes escenarios de gestión y evaluar para las diferentes situaciones climáticas y los diferentes suelos su efecto sobre los resultados económicos y sobre el medio ambiente.

- Simulación de escenarios propuestos por el comité de pilotaje con Olympe, con el objeto de reducir el consumo de agua y la lixiviación de nitratos a nivel regional (soluciones propuestas por los actores a partir de un modelo de optimización bajo restricciones).

3. LA ELABORACIÓN DE LOS MODELOS

3.1. Modelización agronómica a partir del modelo de CropSyst

3.1.1. *Presentación general de CropSyst*

CropSyst es un modelo parcialmente mecanicista, que trata de reproducir de manera dinámica a partir de leyes biológicas y físicas conocidas o de relaciones empíricas el funcionamiento del suelo y de la planta en función del clima y de las prácticas culturales (Stöckle *et al*, 2003). Ha sido desarrollado para un gran número de especies cultivadas a través del mundo: trigo, maíz, sorgo, mijo, cebada, avena, alfalfa, patata, viña, etc. El modelo funciona con un paso de tiempo diario. El ciclo de crecimiento del cultivo se divide en varias fases sucesivas de desarrollo, teniendo cada una de ellas sus propios parámetros para evaluar la rapidez de crecimiento y la repartición de los asimilados en función de factores genéticos, edáficos y medioambientales. Durante cada una de las fases, los factores limitantes (déficit hídrico, nutrición nitrogenada...) intervienen como funciones reductoras del modelo de crecimiento de base.

El modelo de simulación de cultivos CropSyst está dotado de una interfaz de muy fácil utilización en Windows o DOS. En este trabajo, hemos utilizado la versión 3.02.15 (12 de abril de 2001). CropSyst está compuesto de varios módulos que describen la región, el clima, el suelo, la planta, el itinerario técnico.

3.1.2. *Hipótesis de modelización*

El sistema al cual se aplica el modelo está definido por un paralelepípedo de suelo, correspondiente generalmente a una hectárea de superficie, considerado como un medio poroso e indeformable, de propiedades uniformes horizontalmente. El sistema puede eventualmente estar estratificado en varias capas de propiedades diferentes. En todos los casos se encuentra delimitado superiormente por la interfaz suelo (o planta)-atmósfera, e inferiormente por un plano paralelo a la superficie, más allá del cual el agua percolada pasa a la capa freática. La parte superior de este sistema está representada por un cultivo o un barbecho sin laboreo que reacciona sobre el suelo y

que sufre al mismo tiempo el efecto de este. El estudio de este sistema a través de la modelización supone un conjunto de hipótesis (Belhouchette, 2004):

- El balance hídrico a nivel de cada sistema no está influenciado por el sistema adyacente.
- Las características hidrodinámicas del suelo se suponen constantes y no cambian bajo el efecto de las labores del suelo.
- El crecimiento de las plantas está influenciado exclusivamente por los tres factores siguientes: temperatura, radiación por encima del cultivo, agua y nitrato presentes en el suelo.
- La cubierta vegetal se considera homogénea.
- Los efectos de las malas hierbas y de las enfermedades no son tenidos en cuenta por el modelo.

3.1.3. Elección de las parcelas representativas

En este trabajo, el sistema a modelizar viene representado por la asociación de tres componentes: unidad de suelo, planta y clima. Admitiendo que la pluviometría sea homogénea en la región, el sistema se reduce a una asociación suelo-planta, para un año dado. La bibliografía, las encuestas a los agricultores y el grupo de pilotaje nos han permitido establecer parcelas representativas a la escala de cuenca.

3.1.4. Parametrización y validación de CropSyst

Se trata de llegar a un modelo que reproduzca con suficiente precisión el funcionamiento de cada cultivo. Esto implica parametrizar el modelo para cada cultivo, tipo de suelo y clima. La calibración del modelo necesita del ajuste de ciertos parámetros dentro de un intervalo razonable de fluctuación ya definido e identificado en la investigación, de los conocimientos científicos o de las experiencias precedentes desarrolladas en la misma región de estudio (Donatelli *et al*, 1996). Según este principio, algunos parámetros han sido calibrados simplemente minimizando la diferencia entre la biomasa observada y la simulada. Así, han sido considerados **dos** parámetros en la parametrización del modelo, que intervienen en la estimación de la materia seca total: coeficiente «biomasa-transpiración, K_{BT} », la «eficacia de utilización de la radiación, K_{LB} », y la LAI_{max} (2).

(2) LAI_{max} (Leaf Area Index) = índice de superficie foliar. Es el ratio entre la máxima superficie foliar que alcanza el cultivo y la superficie de suelo que ocupa el mismo.

La parametrización se ha efectuado ajustando la biomasa simulada a la biomasa observada durante un año medio. A continuación, la validación se ha realizado comparando la biomasa simulada con la determinada por el grupo de pilotaje durante los años secos y húmedos (gráficos 2, 3 y 4; cuadro 2).

Cuadro 2

VALIDACIÓN DEL MODELO: COMPARACIÓN ENTRE RENDIMIENTOS OBSERVADOS Y SIMULADOS PARA TODOS LOS TIPOS DE SUELO Y UN AÑO MEDIO

	Rdto. observado (kg/ha)	Rdto. simulado (kg/ha)	Diferencia (%)
Trigo duro			
Terrefort	5.000	5.321	-6,0
Alluvions	5.000	5.991	-16,5
Trigo blando			
Terrefort	6.500	6.877	-5,5
Alluvions	6.500	7.027	-7,5
Maíz grano			
Terrefort	9.000	9.380	-4,1
Alluvions	11.000	10.161	8,3
Boulbènes	10.000	8.925	12,1
Maíz semilla			
Terrefort	2.950	2.946	0,1
Alluvions	3.000	3.560	15,7
Boulbènes	3.000	3.392	-11,6
Sorgo en seco			
Terrefort	7.500	7.476	0,3
Alluvions	7.500	8.705	-13,8
Boulbènes	5.000	6.127	-18,4
Sorgo irrigado			
Terrefort	8.000	8.287	-3,5
Alluvions	8.000	9.944	-19,6
Boulbènes	7.000	6.408	9,2
Girasol			
Terrefort	2.000	2.273	-12,0
Alluvions	2.000	2.541	-21,3
Boulbènes	1.700	2.205	-22,9
Girasol irrigado			
Terrefort	2.040	2.026	0,7
Alluvions	2.120	2.107	0,6
Boulbènes	1.600	1.571	0,5

Gráfico 2

Validación del modelo: representación de la correlación entre rendimientos simulados y rendimientos observados para un año seco

$$y = 1,132 x - 281,33$$
$$R^2 = 0,8989$$

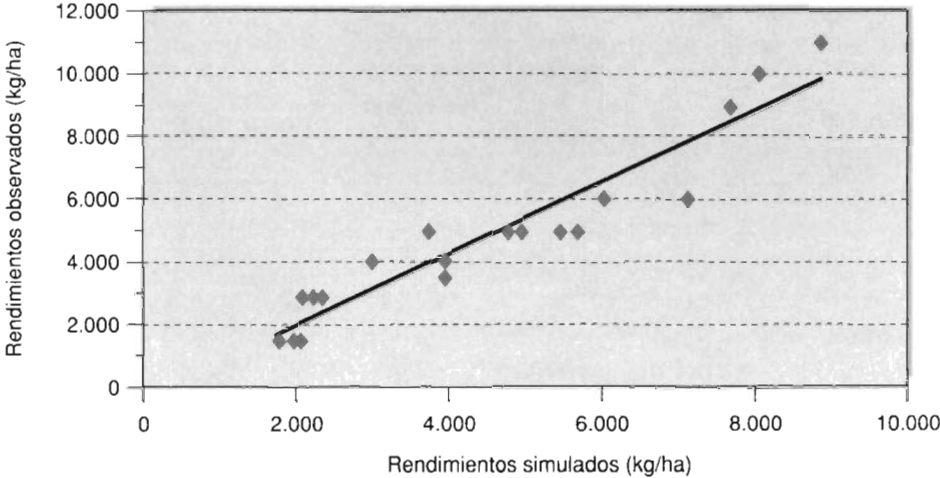


Gráfico 3

Validación del modelo: representación de la correlación entre rendimientos simulados y rendimientos observados para un año de tipo medio

$$y = 1,0293 x - 492,34$$
$$R^2 = 0,9435$$

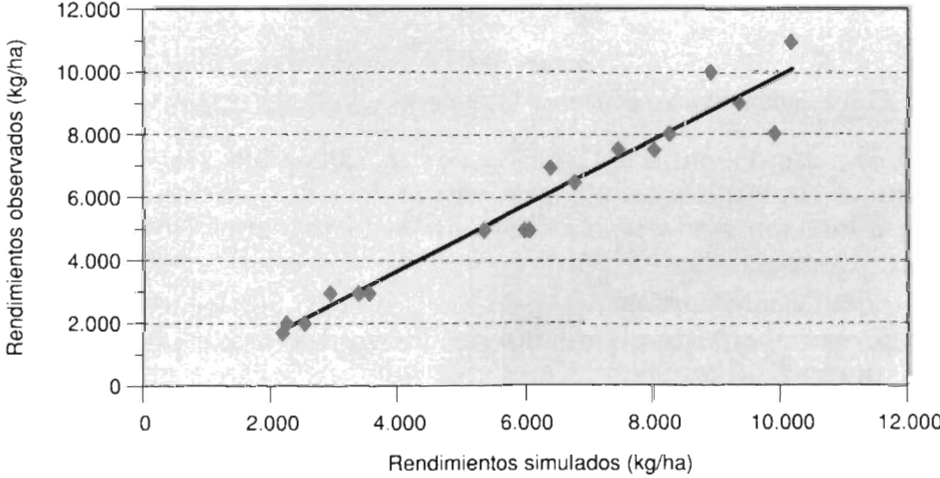
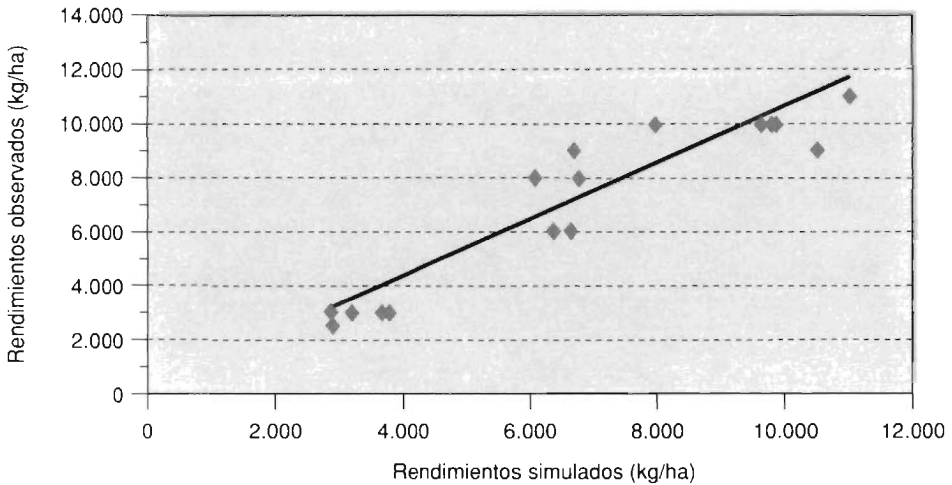


Gráfico 4

**Validación del modelo: representación de la correlación
entre rendimientos simulados y rendimientos observados
para un año húmedo**

$$y = 1,0489 x + 110,56$$

$$R^2 = 0,8636$$



Los gráficos muestran una buena correlación entre los rendimientos simulados por CropSyst y los establecidos por el grupo de pilotaje, con coeficientes de correlación superiores al 75 por ciento. Una vez adaptado a las condiciones locales de la cuenca, el modelo se utiliza para construir una base de datos que contenga para cada cultivo, tipo de suelo, tipo de año climático, dosis de riego y de fertilización nitrogenada: un rendimiento, una cantidad de nitrato lixiviado, un *stock* final de nitrato en el suelo y una dosis de riego óptima.

3.2. El simulador técnico-económico Olympe

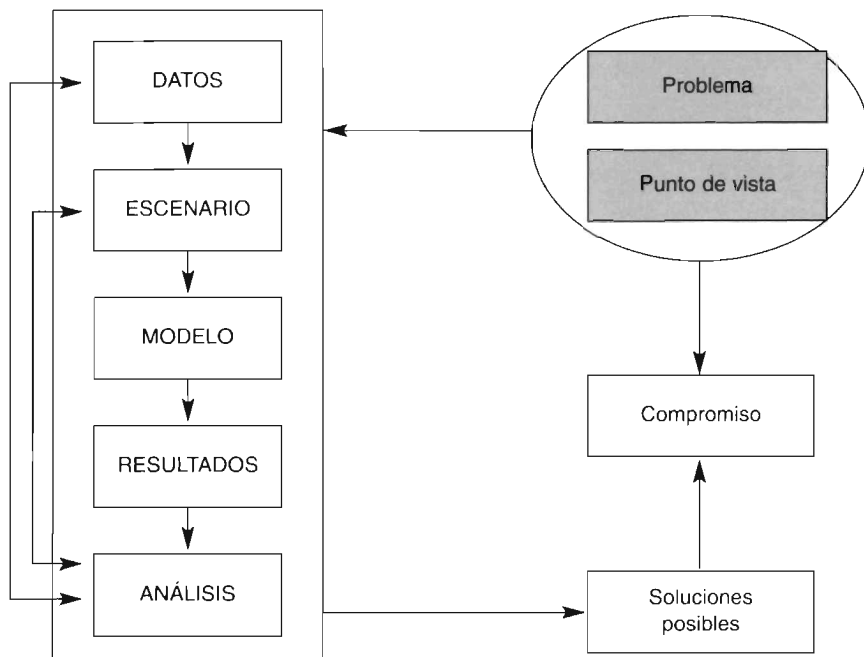
El programa Olympe (3) (Le Bars *et al.*, 2005) integra los aspectos técnicos (itinerarios técnicos) y económicos del funcionamiento de la explotación agrícola, así como las externalidades (lixiviación de nitratos) generadas.

La modelización en Olympe permite prever las consecuencias de los diferentes escenarios planteados por los productores o por los expertos (figura 2).

(3) Programa desarrollado en el INRA-Grignon por J. M. Attonaty.

Figura 2

Modelización en Olympe y construcción conjunta del modelo



Esta herramienta nos permite:

- Obtener una base de datos sobre sistemas de explotación.
- Evaluar las consecuencias de una nueva inversión, de la supresión o de la adición de un elemento de producción, de un cambio en el calendario de cultivos, de un cambio de técnica.
- Integrar en la simulación aleas y evaluar las consecuencias de los sucesos posibles, que pueden ser internos o externos a la explotación, en los resultados del proyecto (evolución de los precios, aleas climáticos, evolución de los mercados).

Olympe permite representar conjuntos de explotaciones mediante una matriz de efectos asociada a un tipo de agricultor. El simulador se comporta revelando el impacto que provocan los cambios de cultivos o de técnicas, pero no permite representar las estrategias y los comportamientos de los diferentes actores en juego. Para modelizar el funcionamiento completo del sistema, es imperativo comprender y formalizar las reglas de decisión de los actores, así como las leyes que rigen estas reglas. Olympe ha sido concebido como una herramienta interactiva que se debe usar conjuntamente

te con un productor o un grupo de agricultores (Attonaty *et al.*, 1999).

La validación del modelo regional elaborado con Olympe se ha efectuado por comparación entre las superficies obtenidas a partir de dicho modelo para cada cultivo y los datos provenientes de las encuestas, así como por las evaluaciones de la oferta y la demanda de agua en la zona.

3.3. Simulaciones y resultados

En primer lugar, los grupos de interés utilizaron el modelo como una herramienta de análisis de la situación actual a diferentes niveles: el volumen de agua demandada para los diferentes tipos de explotación, la contaminación por nitratos y el beneficio económico resultante. Estos aspectos fueron analizados para cada tipo de año y de suelo. Así, el modelo sirve para revelar la situación actual a nivel regional. Cada actor implicado tiene, al principio, sólo una visión parcial de la situación real, con un conocimiento limitado de los otros sistemas de producción, de sus consumos de agua, su aportación a la contaminación por nitratos y sus resultados económicos frente al total. Una vez que la información ha sido compartida y discutida, puede empezar la segunda fase de utilización del modelo. El objetivo es prever, a través de discusión con los actores implicados, posibles escenarios hacia los cuales podrían evolucionar los sistemas de producción de la región y medir su impacto en la demanda de agua, en la contaminación por nitratos y en los resultados económicos.

A partir del modelo regional analizamos las diferentes consecuencias a nivel del conjunto de la cuenca, simulamos las modificaciones posibles a nivel de (i) las prácticas agrícolas (ii) la repartición de los cultivos en la región en función de los tipos de suelos. Entre los escenarios previsibles, hemos probado dos:

- **Escenario 1:** A partir de los resultados de CropSyst, se definieron para los principales cultivos las cantidades óptimas de nitratos a aplicar. Para los cultivos en regadío, se trataron de determinar también las dosis óptimas de agua a aplicar y un calendario óptimo de riego para cada tipo de suelo y cada tipo de año, todo ello sin reducir los rendimientos.

El procedimiento ha consistido en simular los cultivos elegidos con diferentes dosis crecientes de agua y nitratos, conservando el resto de datos relativos a la gestión y manteniendo constantes los parámetros del medio (cultivo, suelo, clima). Para cada dosis de

nitrógeno obtenemos el rendimiento del cultivo y la lixiviación para cada tipo de suelo y tipo de año. A partir de esos datos hemos construido curvas de respuesta del rendimiento de los cultivos a la fertilización y al riego. A partir de esos resultados, hemos elegido como dosis óptimas aquellas que nos dan el rendimiento máximo, que son generalmente menores que las utilizadas en la realidad. Realizamos esta elección con el objeto de minimizar el exceso de insumos que contribuirían a aumentar el riesgo de contaminación y un gasto de agua de riego que no va a hacer aumentar los rendimientos. Una vez elegido el modo de gestión apropiado, hemos introducido los valores obtenidos en el modelo Olympe, el cual permite realizar una agregación a la escala de la zona de producción o bien de la clase de producción. Así, podremos obtener un análisis del impacto de los posibles cambios de gestión a diferentes niveles de agregación, hasta llegar a la escala regional.

Se ha realizado un análisis de las curvas obtenidas para cada combinación de cultivo, tipo de suelo y tipo de año, lo cual nos ha permitido establecer «recomendaciones» acerca de las cantidades de nitratos y de agua aplicadas por los agricultores, así como los rendimientos y la lixiviación obtenidos, con los valores dados por el modelo CropSyst. Para la determinación del calendario de riego, el programa desencadena un riego cada vez que la reserva del suelo alcanza la mitad de la reserva útil.

Los gráficos 5 y 6 representan un ejemplo de curvas de respuesta a la aplicación de distintas dosis de nitrógeno: las del cultivo del maíz, en suelo tipo «terrefort» y año seco.

Estos dos gráficos muestran las curvas de respuesta del maíz grano a la fertilización: (gráfico 5) los rendimientos (kg/ha) y (gráfico 6) la lixiviación de nitratos (kg N/ha) obtenidos en un suelo de tipo «terrefort» y para un año seco. Para cada dosis de nitratos el modelo calcula una dosis de irrigación basándose en el cálculo del balance hídrico.

Los resultados de este primer escenario nos han mostrado que es posible llegar a una disminución de la cantidad de agua consumida acompañada de una disminución de la lixiviación de nitratos sin cambiar las alternativas de cultivo, gracias a cambios en las técnicas de producción (agua, nitratos). Esta mejora no es uniforme en la zona ni para todas las clases de producción. Igualmente, la variabilidad es importante en función del número de años. Así, la disminución del volumen de agua consumida y de la lixiviación de los nitratos tiene lugar principalmente en las zonas de «alluvions» y de

Gráfico 5

Variación del rendimiento del maíz grano respecto a la dosis de fertilización nitrogenada y volumen de riego elegido por el modelo para cada dosis de nitrato en un año seco

"Terrefort". Año seco

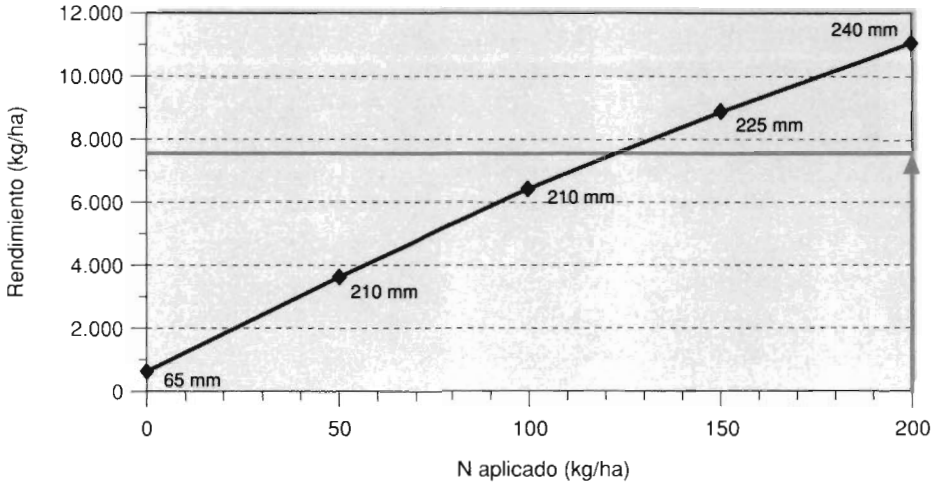
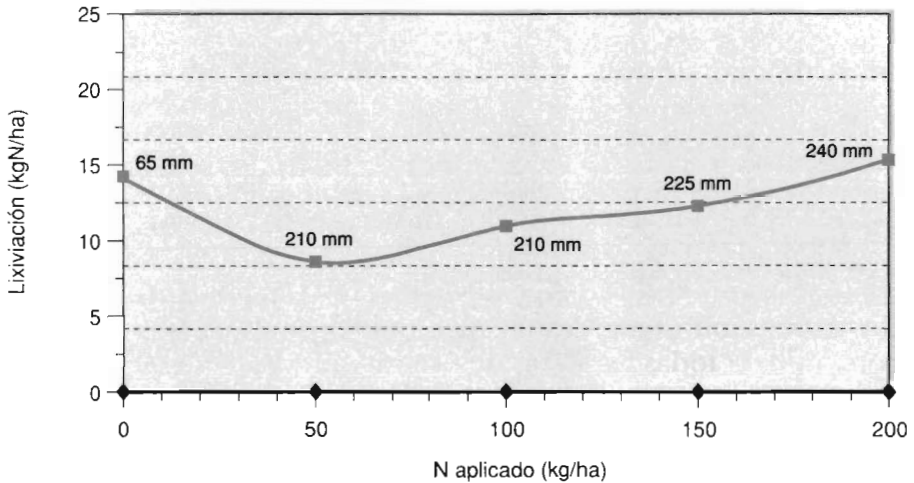


Gráfico 6

Variación de la lixiviación del maíz grano respecto a la dosis de fertilización nitrogenada y volumen de riego elegido por el modelo para cada dosis de nitrato en un año seco

"Terrefort". Año seco



«boulbènes», en las que varía enormemente con el tipo de año respecto del consumo actual. Con los itinerarios técnicos propuestos, hay al mismo tiempo un aumento del margen en relación a la situación actual, consecuencia de una mejor adaptación del nivel de insumos a las necesidades de los cultivos. Aunque este escenario constituye una situación óptima difícil de alcanzar en la realidad, muestra que existe un margen de maniobra que nos va a permitir disminuir el consumo de agua, la contaminación y los costes, todo ello manteniendo los mismos rendimientos en ciertos tipos de suelos y en ciertos sistemas de producción. De este modo, se pueden elaborar recomendaciones y prioridades cuantificables definidas.

- **Escenario 2:** el segundo escenario consiste en la evaluación de una redistribución de la superficie dedicada a cada cultivo.

En este caso no se cuestionan los itinerarios técnicos actuales, sino la elección de los cultivos implantados en cada zona. En este escenario se mantiene para cada cultivo el itinerario observado en la realidad (la que anteriormente llamamos «gestión actual»). Debido a la heterogeneidad de los suelos de la cuenca, cada cultivo se va a adaptar mejor a una zona concreta, puesto que los rendimientos y los consumos de un cultivo dependen del tipo de suelo. Con ayuda de un modelo agregado de programación lineal desarrollado en Excel, procedemos a la optimización de las alternativas de cultivos, eligiendo aquellas que proporcionan el máximo margen global, sujetas a una serie de limitaciones:

- Agronómicas, de mercado, de consumo máximo de agua y de lixiviación de nitratos: relación de proporcionalidad entre diferentes grupos de cultivos, que permitan mantener los tipos de rotaciones actuales. Incluye:
 - mantenimiento de la proporción entre superficie de secano y de regadío,
 - mantenimiento de la proporción entre los diferentes tipos de cultivo en seco,
 - mantenimiento de la superficie en regadío,
 - superficie máxima de cultivos de invierno y de verano.
- Superficie mínima de maíz para ensilado, que permita asegurar la alimentación del ganado (y que depende del número de cabezas de bovino).
- De mercado:
 - superficie máxima para el trigo duro y para el maíz para semilla (puesto que dependen de contratos).

Cuadro 3

EJEMPLO DE RENDIMIENTO, IRRIGACIÓN, FERTILIZACIÓN NITROGENADA Y NITRÓGENO LIXIVIADO PARA EL CULTIVO DEL MAÍZ GRANO, TAL Y COMO SE CULTIVA ACTUALMENTE Y SEGUN LAS RECOMENDACIONES (RESULTADOS DE CROPSYST Y OLYMPE)

Tipo suelo	Tipo año	Gestión actual					Gestión óptima				
		Rdmt (kg/ha)	Irrig (mm)	Fertil (kgN/ha)	Lixiv (kgN/ha)	Stock (kgN/ha)	Rdmt (kg/ha)	Irrig (mm)	Fertil (kgN/ha)	Lixiv (kgN/ha)	Stock (kgN/ha)
Terrefort	Húmedo	10.512	70	200	0,86	18,82	10.512	102	181	0,61	17,24
	Medio	9.380	140	200	2,22	21,89	9.380	172	155	1,37	17,69
	Seco	7.703	200	200	0,78	21,40	7.703	251	127	0,00	11,70
Alluvions	Húmedo	11.019	90	200	1,87	20,89	11.240	70	200	0,45	17,94
	Medio	10.161	200	200	3,88	21,57	11.574	150	200	1,08	17,42
	Seco	8.873	275	200	4,42	23,41	8.686	225	150	0,00	11,59
Boulbènes	Húmedo	9.615	120	200	36,16	11,83	11.007	90	200	10,14	13,93
	Medio	8.925	250	200	13,96	14,54	8.888	160	150	2,15	16,11
	Seco	8.043	400	200	4,16	16,42	8.335	278	150	0,04	12,45

Nota: Los datos correspondientes a la gestión actual y a la óptima se han obtenido respectivamente de las consultas a los actores y del modelo Cropsyst. Para alcanzar el máximo rendimiento, los agricultores aplicaban el mismo nivel de fertilización nitrogenada, independientemente del tipo de suelo y tipo de año.

- De consumo máximo de agua y lixiviación de nitratos:
 - Consumo de agua inferior o igual a 2.000 m³/ha (cantidad propuesta por los actores).
 - Reducción de la lixiviación de un 20 por ciento con respecto a las cifras actuales.

Para la redistribución vamos a considerar los cultivos más representativos de la región, para los cuales conocemos los valores de consumo y de lixiviación, es decir, los mismos cultivos que hemos simulado en CropSyst: trigo duro, trigo blando, maíz grano, maíz de siembra, sorgo de secano, sorgo de regadío, girasol en secano y girasol en regadío. Los valores de los márgenes individuales proporcionados por cada cultivo se toman de los resultados proporcionados por Olympe.

Con el fin de encontrar la combinación óptima de cultivos, se ha establecido para cada una de las 5 zonas de la cuenca un sistema de ecuaciones que reflejan la contribución de cada cultivo al margen, al consumo de agua y a la lixiviación total de nitratos. A continuación se ha maximizado la función margen global, definida como la suma de los márgenes individuales de cada cultivo por la superficie de dicho cultivo en un año determinado. Para tener en cuenta la variabilidad climática, la toma de decisión acerca de la alternativa de cultivo se debe hacer en relación a una función margen única que considere los márgenes de los diferentes tipos de años con su probabilidad de aparición (año seco: 0,18; año medio: 0,68; año húmedo: 0,14). La función objetivo para una zona determinada se define como:

$$M_T = 0,18 * (\sum S_i * M_{is}) + 0,68 * (\sum S_i * M_{im}) + 0,14 * (\sum S_i * M_{ih})$$

Donde:

M_T = margen total (F).

S_i = superficie del cultivo i (ha).

M_{is} = margen del cultivo i en un año seco (F/ha).

M_{im} = margen del cultivo i en un año medio (F/ha).

M_{ih} = margen del cultivo i en un año húmedo (F/ha).

Con la programación lineal, se trata de buscar la combinación de superficies S_i tal que MT se haga máximo, respetando las limitaciones impuestas, especificadas antes.

Pero antes de buscar la repartición óptima de superficies con las nuevas limitaciones medioambientales que vamos a imponer, es

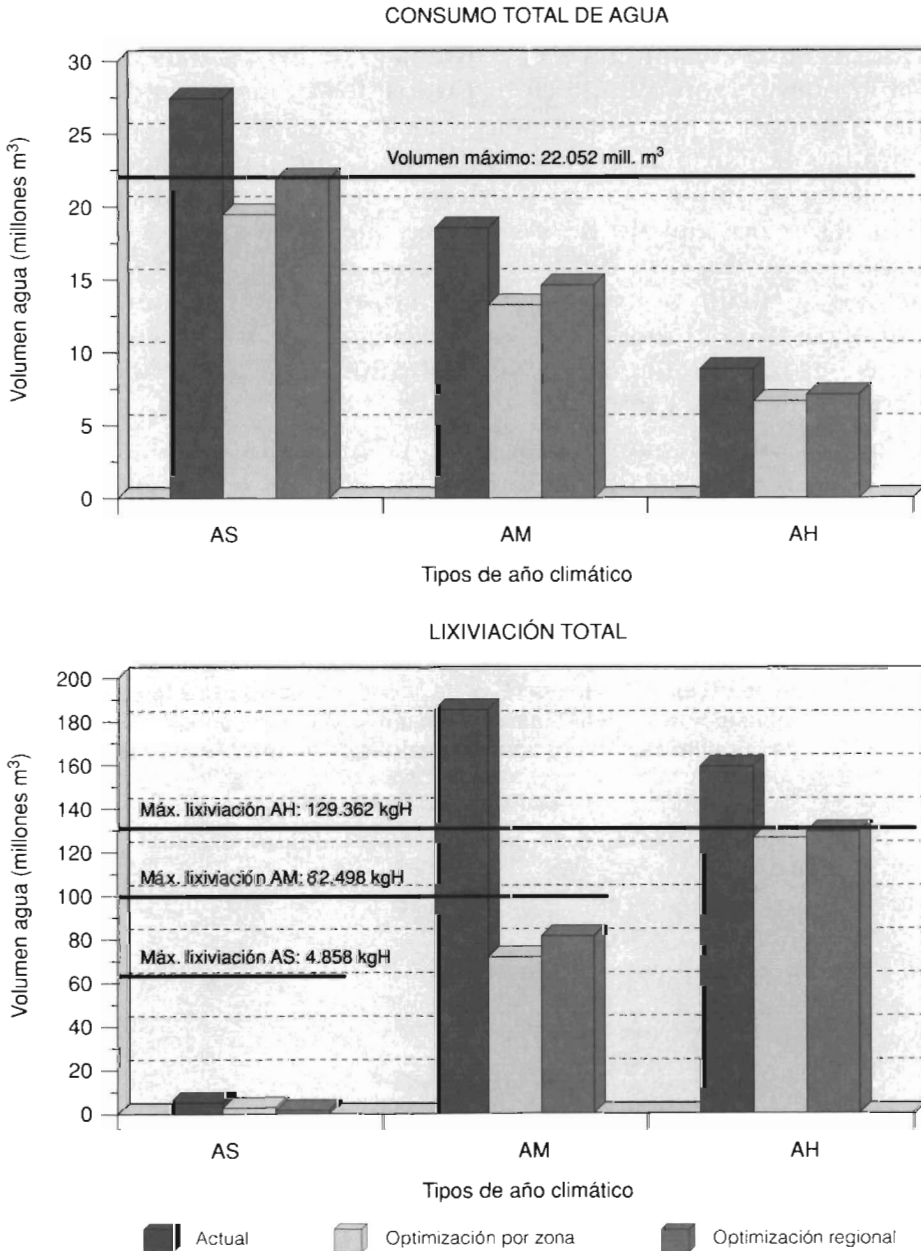
muy importante la etapa de ajuste del modelo, para ver si éste responde bien a la realidad. La fase de ajuste consiste en optimizar la función margen total de cada zona respetando un cierto número de limitaciones agronómicas y de mercado que deben ser respetadas, en concreto: (I) la superficie disponible $S_i = S$ total disponible; (II) limitaciones agronómicas (respeto de rotaciones); (III) Superficie mínima de maíz para ensilado; (IV) limitaciones de mercado (superficie máxima de trigo duro y de maíz de siembra).

La solución que propone el modelo ajustándose a estas limitaciones debe ser próxima a las alternativas reales. Hemos representado la correlación entre las superficies reales y aquellas resultantes de la optimización, y hemos obtenido un coeficiente de correlación de 0,9932. Ahora se trata de buscar para cada zona de producción una nueva repartición de la superficie que optimice la función margen, añadiendo nuevas limitaciones que queremos imponer y que van a reducir el consumo de agua de riego y la lixiviación de nitratos.: (I) Consumo máximo de agua: $E_T = \sum S_i * E_i \leq 2000 * S_T$ irrigada; (II) Cantidad máxima de nitrato lixiviado $L_T = \sum S_j * T_j \leq 0,8 * L_T$ actual. El modelo va a darnos como solución óptima para cada zona una nueva repartición de la superficie, para la cual el consumo de agua no sobrepasará los 2.000 m³/ha y su lixiviación será el 20 por ciento inferior a la lixiviación actual. Esta nueva alternativa implica una disminución del consumo de agua y una disminución de la lixiviación, puesto que se trata de limitaciones que hemos impuesto, pero puede implicar también una disminución del margen.

A continuación hemos agregado los modelos por zona y hemos construido un nuevo modelo del conjunto de la cuenca, que nos permite maximizar el margen a nivel regional. Para ello, vamos a definir una nueva función objetivo global, igual a la suma de los márgenes de cada zona. Después hemos considerado las limitaciones de consumo máximo de agua y máxima lixiviación a nivel del conjunto (2000 m³ por ha de riego en el conjunto de la cuenca y una reducción de la lixiviación total de un 20 por ciento respecto a la actual). Esta nueva optimización supone una compensación del consumo de agua y de la lixiviación de nitratos entre zonas. Las alternativas serán diferentes de aquellas que se obtuvieron anteriormente y obtenemos nuevos márgenes globales por zona. Las alternativas optimizadas propuestas por los modelos van a dar valores de consumo de agua y de lixiviación a nivel regional que comparamos en el gráfico 7 mostrado a continuación.

Gráfico 7

Comparación entre el consumo total de agua por los cultivos optimizados y entre la lixiviación total de nitratos a nivel de la cuenca en la situación actual, después de la optimización por zona y después de la optimización regional, para los tres tipos de años climáticos posibles

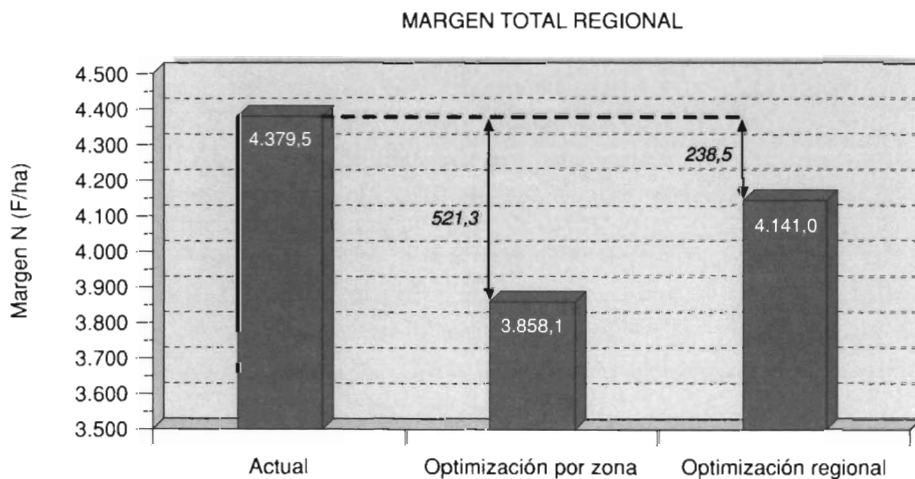


En los dos casos de optimización, obtenemos consumos de agua menores que los que se dan actualmente, por ejemplo en un año seco pasamos de 27,5 millones de m³ en la actualidad a 20,9 millones como resultado de la optimización por zona y a 22 millones en la optimización a nivel del conjunto. Estos consumos son siempre menores en el modelo optimizado por zona que en el resultado de la optimización a nivel del conjunto de la región, pero en ambos casos el agua consumida está por debajo de los 2000 m³/ha irrigada impuestos como limitación. En los dos modelos, la reducción del consumo es más importante para los años secos. Cuando comparamos la lixiviación obtenida, al igual que para el agua consumida, constatamos que en los dos modelos vamos a disminuir la lixiviación por debajo de los límites que hemos impuesto como máximos (reducción del 20 por ciento respecto de la lixiviación actual, calculada por CropSyst). Esta disminución es también más importante en el modelo de optimización por zona, pero la diferencia es mucho menor que para el volumen de agua, sobre todo en los años secos y húmedos.

Comparando el margen total regional obtenido actualmente con el resultante de cada modelo de optimización, vemos el impacto

Gráfico 8

Comparación del margen total (margen combinado, que tiene en cuenta el margen para cada tipo de año climático y la probabilidad de aparición de éstos) a nivel de la cuenca, asociado a los cultivos considerados en la optimización, en la situación actual, después de la optimización por zona y después de la optimización regional



económico que supondría la adopción de las nuevas alternativas propuestas: el modelo optimizado por zona presenta las disminuciones más importantes en el consumo de agua y en la lixiviación. La disminución del margen es asimismo más importante que para el modelo optimizado a nivel de la región (521,3 F/ha frente a 238,5 F/ha). La optimización del margen a nivel del conjunto de la región nos permite llegar a una solución aceptable desde el punto de vista medioambiental (puesto que respeta las limitaciones impuestas, al igual que la solución de la optimización por zona) con un impacto económico muy inferior. Además, la disminución del consumo de agua y de la lixiviación no se reparten de manera homogénea en todas las zonas de producción, sino que éstas se ven afectadas de forma diferente.

La conclusión del escenario 2 es que es posible resolver el consumo de agua y la lixiviación de nitratos a nivel regional a través de la redistribución de las superficies de los cultivos, respetando siempre las limitaciones agronómicas y de mercado que afectan a la producción de la región. Esta reducción del consumo de agua y de la lixiviación de nitratos afecta principalmente a las zonas que presentan actualmente los valores más críticos. La disminución del consumo y de la lixiviación van acompañadas de una reducción del margen bruto obtenido, que es mucho menos importante cuando realizamos una optimización para el conjunto de la región en la cual se consideran las limitaciones de agua y de lixiviación de nitratos a nivel agregado. Esto nos muestra que en la búsqueda de un óptimo con objetivos comunes es posible llegar a una mejor solución a través de la negociación, cuando consideramos acciones posibles a nivel del conjunto.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Con el objeto de encontrar alternativas al modo de gestión del agua en la cuenca, se ha utilizado un modelo de funcionamiento del sistema agrícola de la misma, capaz de mostrar la evolución del consumo de agua y de insumos, así como las interacciones entre las distintas zonas de producción. El modelo, que ha sido calibrado y validado por los actores, nos ha permitido probar diferentes opciones de gestión del agua y proceder a la elaboración de escenarios.

La integración de los modelos biofísico y agroeconómico permite una complementariedad entre distintas disciplinas, constituyendo un vínculo entre el sistema físico y económico, entre las técnicas de producción de los cultivos y su impacto medioambiental y económi-

co. Una vez modelizado el sistema agrario de la cuenca, se han probado distintos cambios que nos permiten reducir el consumo de agua y la contaminación por nitratos.

Los primeros resultados del modelo (con los datos de campo) permitieron constatar que la heterogeneidad de suelos y de cultivos de la cuenca lleva a variabilidad en los volúmenes de agua consumida y de las cantidades de nitratos lixiviados. Por otra parte, esta variación de comportamiento de los cultivos por zonas tiene como consecuencia resultados económicos heterogéneos. A la hora de probar escenarios, hemos tenido en cuenta esta diversidad, sabiendo que cada zona de producción tendrá su propia respuesta a los cambios propuestos.

El primer escenario propuesto es el cambio de técnicas de producción para adaptar la aplicación de insumos (agua y nitratos) a las necesidades de las plantas, intentando que no se apliquen excesos que contribuirían a la contaminación. Los resultados de este primer escenario nos han mostrado que es posible llegar a una disminución de la cantidad de agua consumida acompañada de una disminución de la lixiviación de nitratos sin cambiar los cultivos. Esta mejora no se da por igual en todas las zonas ni para todas las clases de producción, y depende también de la pluviometría del año. Así, la disminución del volumen de agua consumida tiene lugar principalmente en las zonas con suelos tipo «alluvions» y «boulbènes», en las que varía entre el 14 y el 34 por ciento, según el tipo de año climático, con respecto al consumo actual. Esta disminución de volumen de agua es mucho más importante para los años secos y menos importante en años húmedos. En cuanto a la disminución de la lixiviación de nitratos, hemos constatado que es más importante en los años climáticos de tipo medio. Con los itinerarios técnicos propuestos, se produce al mismo tiempo un aumento del margen con respecto a la situación actual, consecuencia de una mejor adaptación del nivel de insumos a las necesidades de los cultivos. Aunque este escenario constituya una situación óptima difícil de conseguir en la realidad, muestra que existe un margen de maniobra que nos va a permitir disminuir el consumo de agua, la contaminación y los costes, conservando los mismos rendimientos.

El segundo escenario propuesto es la optimización de la distribución de la superficie a través de programación lineal. Esta vez, sin cambiar los itinerarios técnicos de los cultivos, se consigue también una disminución del consumo de agua y una disminución de la lixiviación, que no son de la misma magnitud en las diferentes zonas de producción desde el punto de vista medioambiental. Dichas disminu-

ciones suponen también una disminución del margen. Hemos construido dos modelos de programación lineal: un primer modelo en el que las limitaciones son consideradas de forma separada para las distintas zonas, y un segundo modelo en el que las limitaciones se aplican a nivel del conjunto, es decir, se permite que una determinada zona sobrepase el límite impuesto con respecto al consumo de agua o a la lixiviación, siempre y cuando exista una compensación con las otras zonas que haga que el conjunto de la cuenca se mantenga por debajo de los límites globales. Si comparamos los dos enfoques, constatamos que con el segundo modelo nos acercamos más a los límites impuestos. Se observa también una disminución del margen, que aunque sigue estando desigualmente repartido tanto a nivel global como entre casi todas las zonas, esta disminución del margen es también menos importante en el segundo modelo (maximización a nivel del conjunto).

Las herramientas presentadas en este artículo constituyen un modo de representar la realidad de una manera simplificada, permitiendo mostrar los resultados de posibles cambios en las alternativas de cultivos y en las técnicas culturales, tanto desde el punto de vista económico (ingresos de los agricultores) como medioambiental (consumo de agua, contaminación), teniendo en cuenta las condiciones de clima, de suelo y los aleas que pueden ocurrir. La principal debilidad de nuestros modelos es su carácter estático, ya que no permiten tener en cuenta los efectos acumulativos a lo largo del tiempo. Sin embargo, no habríamos podido construir modelos dinámicos a causa de la falta de datos sobre las rotaciones llevadas a cabo.

Pero no queremos pararnos en la representación del sistema; el objetivo de la construcción de los modelos y de la simulación de escenarios es conseguir una interacción con los agricultores que haga más sencillo el proceso de negociación. Una de las perspectivas posibles de este trabajo es establecer un diálogo con los actores a través de la discusión de los resultados obtenidos en las simulaciones, tratando de encontrar soluciones conjuntamente, que satisfagan a todas las partes. La etapa de negociación podría plantearse como un juego de simulación con el conjunto de los grupos de interés.

Esta metodología se inscribe dentro de la nueva concepción de la legislación medioambiental francesa que, en los últimos años, concede una importancia creciente a los procedimientos de participación pública, con una repercusión en la decisión más o menos importante, que conducen a la adopción de principios de gestión más durables. La ley del agua (1992) es una buena muestra de este procedimiento, en el que el Estado conserva la autoridad formal de

la decisión, pero delega a una comisión local del agua la tarea de precisar el contenido de un posible acuerdo que la autoridad, fuera de una situación de crisis, ratificará. Desde el momento en que se ha definido una problemática explícita, las partes interesadas y las variables negociadas son conocidas y resta explicitar las reglas de distribución de los costes del acuerdo 2. Las hipótesis de robustez del acuerdo que aseguran una gestión durable del recurso conducen a describir un proceso de comunicación entre las partes, permitiéndoles explorar las soluciones posibles y de llegar a un acuerdo satisfactorio para todos.

Con la construcción del modelo de funcionamiento de la agricultura de la cuenca y la propuesta de escenarios, hemos conseguido:

- Hemos mostrado el papel que desempeña la agricultura en el conflicto: se trata de la actividad que consume la parte más importante del recurso (80 por ciento del total del agua consumida en la cuenca) y contribuye a la contaminación de las aguas a través de la lixiviación de nitratos.
- Hemos mostrado también que es posible reducir este consumo de agua y esta lixiviación de nitratos mediante cambios en las prácticas culturales o mediante cambios en las alternativas de cultivos.
- Como investigadores, hemos aplicado nuestros conocimientos y nuestras herramientas para facilitar las negociaciones entre actores en este conflicto de uso: nuestra forma de tratar los problemas de gestión del agua ha contribuido a mejorar el diálogo, favoreciendo reuniones y reflexiones en común.
- No podemos decir todavía si habrá acuerdo entre los actores para resolver los problemas de asignación de los recursos hídricos y para detener el deterioro de su calidad en la cuenca del Aveyron-Lère, pero hemos demostrado que existen técnicas de producción y modos de organización de los cultivos que pueden mejorar la gestión del recurso tanto desde el punto de vista de su volumen como de su calidad.

BIBLIOGRAFÍA

- AGRESTE (2002): *L'agriculture en Tarn-et-Garonne*. Paris: Ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche et des affaires rurales. Montauban: Direction départementale de l'agriculture et de la forêt.
- ANTLE, J. M. y STOOBVOGEL, J. (2001): «Integrating site-specific biophysical and economic models to assess trade-offs in sustainable land use and soil quality». *Economic policy and sustainable land use*. 169-184.

- AQUALIS, ARTLINE, OREADE (1997a): *Etudes préalables au contrat de rivière Aveyron aval-Lère*. Rapport de phase I: diagnostic; qualité et gestion des ressources en eau. Montauban: Conseil Général du Tarn et Garonne.
- AQUALIS, ARTLINE, OREADE (1997b): *Etudes préalables au contrat de rivière Aveyron aval-Lère*. Rapport de Synthèse du Rapport Définitif. Montauban: Conseil Général du Tarn et Garonne.
- ATTONATY, J. M. y SOLER, L. G. (1992): «Aide à la décision et gestion stratégique: un modèle pour l'entreprise agricole». *Revue Française de Gestion*, 1992, 8: 45-54.
- ATTONATY, J. M. y LE GRUSSE, P. (1994): «Helping farmers in strategic decision-making. Training of executives from different Mediterranean countries: an experiment». In Jacobsen, B.; Pedersen, D.; Christensen, J.; Rasmussen, S. *Farmers' decision making, a descriptive approach*. Copenhagen: Institute of Agricultural Economics: 235-245. 38th EAAE Semi-ton, 3 et 5 octobre 1994.
- ATTONATY, J. M.; CHATELIN, M. H. y GARCÍA, F. (1999): «Interactive simulation modelling in farm decision-making». In *Computers and Electronics in agriculture*, 22 (1999): 157-170.
- BARBIER, B. y BERGERON, G. (1999): «Impact of policy interventions on land management in Honduras: results of a bioeconomic model». *Agricultural Systems*, 60: 1-16.
- BELHOUCLETTE, H. (2004): *Evaluation de la durabilité de successions culturales à l'échelle d'un périmètre irrigué en Tunisie: utilisation conjointe d'un modèle de culture (CropSyst), d'un SIG et d'un modèle bio-économique*. Thèse de doctorat en Sciences Agronomiques, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier. UMR Fonctionnement et conduite des systèmes de culture tropicaux et méditerranéens.
- CARMONA, G. (2004): *Modèles de simulation de l'agriculture d'un bassin versant. Application au bassin Aveyron aval-Lère*. Master professionnel Gestion des Exploitations Agricoles et Environnement. CIHEAM-IAM Montpellier.
- CRETENET, M. (1995): «Conception de systèmes de culture durables. Expérimentation et enquête dans l'étude de la fertilité des sols». In: *Sustainable land management in African semi-arid and subhumid regions*. Proceedings of the SCOPE workshop, 15-19 November 1993, Dakar, Senegal. CIRAD (ed), Montpellier-France: 131-139.
- FALCONER, K. y HODGE, I. (2001): «Pesticide taxation and multi-objective policy-making: farm modelling to evaluate profit/environment trade-offs». *Ecological Economics*, vol. 36: 263-279.
- FLICHMAN, G. (1997): «Bio-economic models integrating agronomic, environmental and economic issues with agricultural use of water [on line]». In: Dupuy B (ed.). *Aspects économiques de la gestion de l'eau dans le bassin méditerranéen: actes de l'atelier de Marrakech*; 1995/05/17-19. Bari (Italie): CIHEAM-IAM: 327-336 (Options Méditerranéennes: série A. Séminaires méditerranéens, 31).
- FOLTZ, J. C.; LEE, J. G.; MARTÍN, M. A. y PRECKEL, P. V. (1995): «Multiattribute Assessment of Alternative Cropping Systems». *American Journal of Agricultural Economics*, 77: 408-420.

- HAGGAR, J.; AYALA, A.; DÍAZ, B. y REYES, C. U. (2001): «Participatory design of agroforestry systems: developing farmer participatory research methods in México». *Development in Practice*. London: Intermediate Technology, (vol. 11) 4: 417-424.
- INRA (1989): *Carte des sols dans la région de l'Aveyron lère*. Chambre d'agriculture Midi-Pyrénées.
- JUST, R. E. y ANTLE, J. M. (1990): «Interactions Between Agricultural and Environmental Policies: A Conceptual Framework». *American Economic Review*, 80: 197-202.
- KUNTASHULA, E. y MAFONGOYA, P. L. (2005): «Farmer participatory evaluation of agroforestry trees in eastern Zambia». *Agricultural Systems*, vol. 84: 39-53.
- LE BARS, M.; ALLAYA, M.; LE GRUSSE, Ph.; ATTONATY, J. M. (2005): *OLYMPE, Manuel d'utilisation*. CIHEAM-IAMM Editions (ISBN: 2-85352-305-5): 120 p.
- LE GRUSSE, Ph. (2001): «Du "Local au Global": Les dynamiques agro-alimentaires territoriales face au Marché Mondial». Quels instruments d'aide à la décision pour l'élaboration de Stratégies Territoriales? In: *Options méditerranéennes*.
- MENDOZA, G. A. y PRABHU, R. (2005): «Combining participatory modeling and multi-criteria analysis for community-based forest management». *Forest Ecology and Management*, vol. 207: 145-456.
- MICKWITZ, P.; MELANEN, M.; ROSENSTRÖM, U. y SEPPÄLÄ, Y. (2005): «Regional eco-efficiency indicators in a participatory approach». *Journal of Cleaner Production*, in press.
- OKALI, C.; SUMBERG, J. y FARRINGTON, J. (1994): *Farmer Participatory Research: Rhetoric and Reality*.
- PACINI, C.; WOSSINK, A.; GIESEN, G.; VAZZANA, C. y OMODEI-ZORINI, L. (2001): «Environmental Accounting in Agriculture: a Methodological Approach». *Submitted for publication to Agricultural Systems*.
- RAUSCHMAYER, F. y RISSE, N. (2005): «A Framework for the selection of participatory approaches for SEA». *Environment Impact Assessment Review*, vol. 25: 650-666.
- REVEL, J. C. (1982): «Formation des sols sur marnes. Étude d'une chronoséquence et d'une toposéquence complexes dans le terrefort toulousain». *Thèse Sci., INP Toulouse*: 249 p.
- SIEBENHÜNER, B. y VOLKER, B. (2005): «The role of computing modelling in participatory integrated assessments». *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 25: 367-389.
- STÖCKLE, DONATELLI *et al.* (2003): «Cropsyst, a cropping system simulation model». *European journal of agronomy*, Vol. 18.

RESUMEN

Construcción participativa de un modelo de gestión de la explotación agrícola para el apoyo a la toma de decisión colectiva. Aplicación al caso de la cuenca de Aveyron-Lère

El objetivo de este trabajo es el desarrollo, con la participación de los grupos de interés, de instrumentos y métodos sencillos que faciliten la toma de decisión de un colectivo. Esta experiencia se apoya en una investigación llevada a cabo con agricultores y responsables profesionales (Proyecto Aquae (4) en la cuenca hidrográfica Aveyron-Lère. En este contexto se ha tratado de 1) crear un modelo de la cuenca hidrográfica para evaluar el consumo de agua, las pérdidas de nitratos de la zona, y de 2) simular escenarios para analizar posibles mejoras en la gestión. Se han probado dos tipos de escenarios con el objetivo de ajustar el uso del agua a los volúmenes disponibles y de disminuir las pérdidas de nitratos: en primer lugar una optimización del riego y de la fertilización, y después una gestión de las rotaciones a escala de zona (cinco zonas en las que se ha dividido la cuenca hidrográfica), así como a escala de la cuenca. El modelo permite evaluar, para distintos escenarios de gestión, el coste que supone para los productores agrícolas el respeto de las normas establecidas sobre uso de agua y fertilización en función de la variabilidad climática interanual.

PALABRAS CLAVE: Modelos participativos, toma de decisión colectiva, sistema de cultivo, contaminación, riego.

SUMMARY

Participative elaboration of a farm management model to support collective decision making

The aim of this study is to develop simplified tools and methods in collaboration with the participation of local stakeholders for facilitating collective decision-making. The project is based on a series of experiments carried out with farmers, environmental officers and researchers (Aquae project) on the Aveyron-Lère catchment area. Within this framework: 1) a model of the catchment was constructed in order to examine water consumption and nitrate losses in the area, and 2) scenarios were simulated so as to assess possible management improvement. Two types of scenarios were tested with the objective of limiting water use to available volumes and reducing nitrate losses: first, irrigation and fertilisation optimization; after that crop rotation management at local scale (in the five zones defined in the catchment), as well as at the scale of the whole basin. The model allows the evaluation, for the different management scenarios, the cost for the farmers of respecting current water and fertilization regulations, as a function of the inter-annual climatic variability.

KEYWORDS: Participative modelling, collective decision making, cropping system, pollution, irrigation.