J. Causapé Valenzuela e I. Clavería Laborda

INFLUENCIA DEL RÉGIMEN DE LLUVIAS SOBRE EL IMPACTO AGROAMBIENTAL DEL REGADÍO. UN CASO EN BARDENAS (ZARAGOZA)

Separata ITEA

INFORMACIÓN TÉCNICA ECONÓMICA AGRARIA, VOL. **102** N.º 4 (386-397), 2006

Influencia del régimen de lluvias sobre el impacto agroambiental del regadío. Un caso en Bardenas (Zaragoza)

J. Causapé Valenzuela e I. Clavería Laborda

Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria del Gobierno de Aragón (CITA-DGA).
Apdo. 727, 50.080 Zaragoza. jcausape@aragon.es

Resumen
La agricultura de regadío es causante de un cierto deterioro de la calidad de ríos y acuíferos. El objetivo de este estudio es analizar las repercusiones ambientales que provocan los cambios del régimen de lluvias en un regadío típico del valle del Ebro.
Se comparó la eficiencia del riego e impacto agroambiental de una cuenca de regadío (95 ha) en dos años hidrológicos con diferente pluviometría [oct-00/sept-01 (526 mm/año) *vs.* oct-04/sept-05 (211 mm/año)]. Para ello, se ejecutaron balances de agua y se midió la cantidad y calidad (salinidad y nitratos) del agua circulante por el desagüe de la cuenca.
Los resultados indican que en 04/05 los agricultores ajustaron mejor las dosis de cada riego disminuyendo la fracción de drenaje del mismo (50% *vs.* 31%) y aumentando la eficiencia en el uso consuntivo de agua (56% *vs.* 79%). No obstante, la sequía de 04/05 condicionó un inadecuado manejo del riego ya que los cultivos sufrieron un mayor déficit hídrico (3% *vs.* 23%). En 04/05, las aguas de drenaje presentaron mayor conductividad eléctrica (0,92 dS/m *vs.* 0,94 dS/m) y menor concentración de nitrato (96 mg/l *vs.* 74 mg/l). En este último año se exportó en el drenaje un 55%, un 54% y un 65% menos, de agua, sales y $N\text{-}NO_3^-$, respectivamente.
El menor impacto medioambiental del año 04/05 estuvo influenciado por el mayor aprovechamiento de los recursos hídricos y agroquímicos. No obstante, es necesario continuar optimizando las prácticas agrarias, principalmente del riego y fertilización, para minimizar la contaminación por nitratos y afrontar años de sequía.

Palabras clave: Agua, riego, fertilización, contaminación, sales, nitrato

Summary
The influence of pluviometry on the agri-environmental impact of irrigation land. A case in Bardenas (Zaragoza)
Irrigated agriculture is causing certain deterioration of the quality of rivers and aquifers. The objective of this study is to analyse the agri-environmental repercussions caused by climatic changes in typical irrigated land in the Ebro valley (Spain).
The irrigation efficiency and agri-environmental impact in a basin of irrigated land (95 ha) were compared in two hydrological years with different pluviometry [Oct-00/Sept-01 (526 mm/yr) *vs*. Oct-04/Sept-05 (211 mm/yr)]. For this end, water balances were carried out in every plot and the quantity and quality (salinity and nitrates) of the water circulating through the drainage of the basin were gauged.
The results indicate that in 04/05 farmers adjusted the irrigation dosis better on each irrigation occasion, thus diminishing the fraction of drainage of the same (50% *vs*. 31%) and increasing the consumptive water use efficiency (56% *vs*. 79%). Nevertheless, the drought of 04/05 determined inappropriate irrigation management since the crops suffered a greater water deficit (3% *vs*. 23%). In 04/05, drainage waters presented higher electric conductivity (0.92 dS/m *vs*. 0.94 dS/m) and smaller nitrate

concentration (96 mg/l *vs*. 74 mg/l). In this last year, 55%, 54% and 65% less, of water, salts and N-NO_3^- respectively were exported in the drainage.
The lesser environmental impact in the year 04/05 was influenced by more appropriate use of water and agrichemical resources. Nevertheless, it is necessary to continue optimizing agricultural practices, mainly irrigation and fertilization, in order to minimize nitrate pollution and to confront years of drought.

Key words: Water, irrigation, fertilization, pollution, salt, nitrate

Introducción

La eficiencia en el uso del agua de riego y la contaminación difusa que provocan los regadíos son temas de gran preocupación en países semiáridos, que como España, tienen recursos hídricos limitados sujetos a un progresivo deterioro de su calidad. La agricultura de regadío, como cualquier otra actividad que se abastece de agua y devuelve parte de ella, más o menos contaminada al medio natural, es causante de un cierto deterioro de la calidad del agua de ríos y acuíferos.

En la cuenca del Ebro se han llevado a cabo una serie de estudios encaminados a cuantificar la eficiencia del riego y el impacto medioambiental (salinización y contaminación por nitratos de las aguas de drenaje) de pequeñas cuencas de regadío (entre 100 y 5.000 ha).

A esta escala de estudio, valores representativos de la cuenca del Ebro constatan una baja-moderada eficiencia de riego de las zonas con riego por inundación sobre suelos inadecuados para ello (51%), moderada-alta eficiencia de las zonas con riego por inundación sobre suelos adecuados (79%), y alta eficiencia en las zonas con riego por aspersión altamente tecnificado (94%) (Causapé *et al.*, 2004).

Áreas salinas que presentan baja eficiencia en el riego y fertilización nitrogenada pueden llegar a exportar 20 t/ha·año de sales y 200 kg N-NO_3^-/ha·año. Sin embargo, las menores masas de sales (3 t/ha·año) y nitrógeno (25 kg N-NO_3^-/ha·año) exportadas en zonas con alta eficiencia de riego y fertilización nitrogenada muestran la posibilidad de disminuir sensiblemente las afecciones medioambientales de los regadíos más contaminantes (Causapé *et al.*, 2004).

Muchos de los estudios realizados para identificar y cuantificar los principales problemas medioambientales del regadío, han sido efectuados mediante el seguimiento de tan solo un año hidrológico, lo que ha impedido analizar el efecto de la variabilidad temporal climática y agronómica sobre dichos problemas. Este trabajo compara el impacto medioambiental externo de una pequeña cuenca hidrológica de regadío en dos años hidrológicos (oct-00/sept-01 y oct-04/sept-05) muy diferentes en cuanto a pluviometría, disponibilidad de agua de riego, cultivos y manejo de los insumos.

Descripción del área y años de estudio

La cuenca drenada por el desagüe D-XIX-6 (94,5 ha), se localiza en la Comunidad de Regantes nº V (CR-V) de Bardenas (Zaragoza). Se sitúa sobre un pequeño valle desarrollado desde el glacis de Miraflores hacia el aluvial del río Riguel. Los suelos desarrollados sobre el glacis ocupan un 67% de la superficie de la cuenca y se caracterizan por ser suelos pedregosos y poco profundos (presencia de petrocálcicos) que condicionan una baja capacidad de retención de agua disponible (CRAD= 85 mm, Causapé, 2003). En cambio, los suelos desarrollados sobre el aluvial (33% de la superficie) no tienen piedras ni horizontes petrocálcicos

superficiales que limiten su profundidad, lo que les confiere una mayor CRAD (176 mm; Causapé, 2003).

La precipitación media anual de la zona es de 419 mm (Instituto Nacional de Meteorología [INM] en la estación de Santa Anastasia entre 1965 y 1994), registrada principalmente en las estaciones de primavera y otoño. No obstante, la variabilidad pluviométrica anual es elevada como demuestran las diferencias presentadas entre los dos años hidrológicos estudiados (00/01 y 04/05). Así pues, la precipitación en 00/01 fue un 25% superior a la media histórica mientras que 04/05 fue un año extremadamente seco en el que la precipitación anual (211 mm) tan solo supuso la mitad de la media histórica y un 40% de la registrada en 00/01 (526 mm). En cuanto a la evapotranspiración de referencia (ET_0), la media histórica asciende a 1084 mm/año (método de Hargraves con datos del INM registrados en la estación de Santa Anastasia entre 1965 y 1994) alcanzando los máximos valores en verano. La ET_0 del año hidrológico 00/01 (1.093 mm, método de Penman-Monteith [Allen *et al.*, 1998]) fue similar a la media histórica mientras que el año 04/05 presentó una ET_0 anual un 25% superior (1.363 mm).

Prácticamente la totalidad de la cuenca (95% de la superficie) esta ocupada por parcelas bajo riego por inundación mientras que el resto de la superficie de la cuenca (5% de la superficie total) la ocupan eriles, caminos, acequias, desagües y casetas de campo. El agua de riego es de buena calidad (CE= 0,3 dS/m y [NO_3^-]< 2 mg/l) procedente del embalse de Yesa (Río Aragón, Pirineo Central).

La sequía de 04/05 redujo considerablemente las dotaciones de riego en la CR-V (6.300 m^3/ha de 04/05 frente a los 11.000 m^3/ha de 00/01) y ello condicionó cambios en la planificación de cultivos por parte de los agricultores. Así, mientras en 00/01 la cuenca estuvo prácticamente ocupada por maíz (47% de la superficie) y alfalfa (46% de la superficie) con un pequeño porcentaje de cereal de invierno (1%) y puerros (1%), en 04/05, la superficie de alfalfa (37%) y particularmente de maíz (11%) fue sensiblemente menor, incrementándose el porcentaje de cultivos con menores necesidades de riego (cereal de invierno-24%, girasol-8%, hierba-7% y guisantes-2%). La superficie de barbecho inexistente en 00/01 supuso en 04/05, un 7% de la superficie de la cuenca (fig. 1).

Asimismo, entre los dos periodos estudiados ha habido cambios significativos en la gestión del agua. Mientras que en 2001 la CR-V facturaba el agua de riego a sus agricultores mediante el cobro por superficie y los agricultores regaban por un sistema a turnos, en 2005, la CR-V utilizó una tarifa binómica (cobro por superficie de riego y consumo de agua) y los agricultores solicitaron la fecha y volumen de cada riego (riego a la demanda). Estos cambios en la gestión estuvieron destinados a alcanzar un uso más racional y eficiente del agua.

Objetivos

Este trabajo analiza y cuantifica las repercusiones medioambientales externas provocadas por un regadío en dos años hidrológicos con fuertes contrastes climáticos y agronómicos. Concretamente, se analizan los efectos agro-ambientales inducidos por el riego en la cuenca del desagüe D-XIX-6 en dos años hidrológicos (00/01 y 04/05) con distintas precipitaciones, distribución de cultivos y gestión del riego.

Metodología

Se ejecutó la aplicación informática BAS (Balance Agua Suelo) en la cuenca drenada por el desagüe D-XIX-6 en los años hidrológicos 00/01 y 04/05. La aplicación BAS, des-

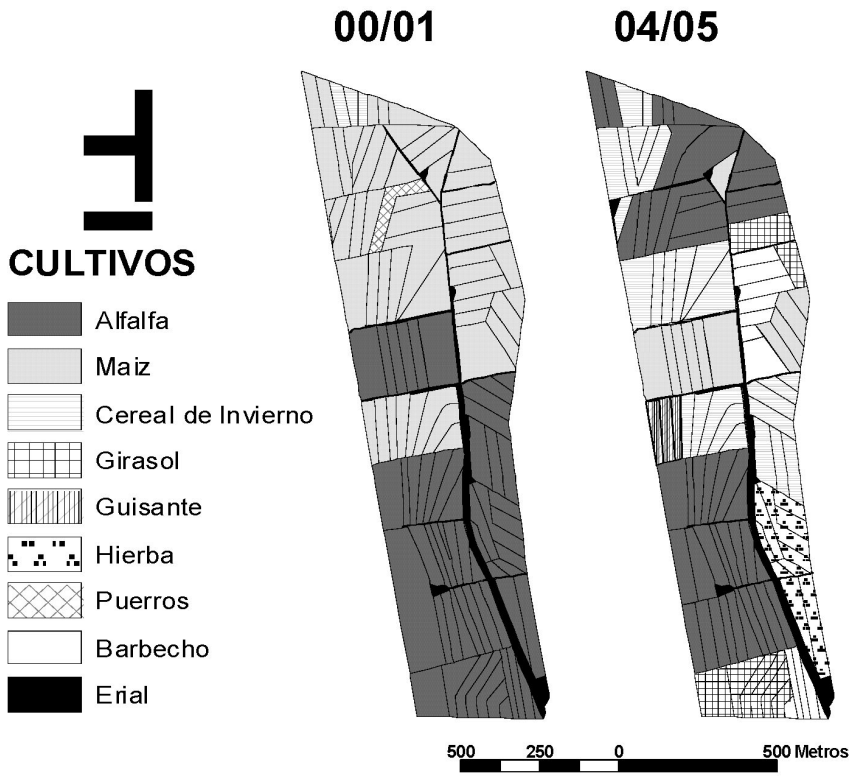


Figura 1. Distribución de cultivos en la cuenca D-XIX-6 en los años hidrológicos 00/01 y 04/05.
Figure 1. Crop pattern in D-XIX-6 basin in 00/01 and 04/05 hydrological years.

crita ampliamente en Causapé (2003), se basa en la ecuación:

$$(R + P) - (ET_R + D) = \Delta A$$

donde, las entradas de agua por el riego (R) y precipitación (P) menos las salidas por la evapotranspiración (ET_R) y el drenaje (D) son iguales al incremento de agua en el suelo (ΔA).

El programa asume que toda el agua de riego y lluvia se infiltra en el suelo. Esta aproximación es válida para la zona de estudio dado que las parcelas se encuentran abancaladas y limitadas por caballones que impiden la escorrentía superficial.

Los volúmenes diarios de riego para cada parcela y de precipitación, fueron obtenidos de la base de datos de la CR-V y de las estaciones agroclimáticas que la red SIAR tiene en la zona (http://oficinaregante.aragon.es). La ET_0 diaria (http://oficinaregante.aragon.es), junto a los coeficientes de cultivo e información agronómica de la zona (CHE, 2004) permitió calcular la evapotranspiración potencial de los cultivos (ET_C) diaria en cada parcela ($ET_C = K_C \cdot ET_0$). Para los días y parcelas sin cultivo se estimó una K_C según la metodología propuesta por Allen *et al.* (1998).

Así pues, BAS generó balances de agua para cada parcela de la cuenca estimando diariamente la humedad del suelo, la evapotranspiración real y el drenaje, a partir de la ET_C, de los parámetros hídricos del suelo ($CRAD_{parcelas\ sasos}$=85 mm y $CRAD_{parcelas\ aluvial}$= 176 mm) y de la humedad inicial de éste (humedad el 1 de octubre), que por desconocerse se estimó en la mitad de su CRAD.

Por otro lado se midió la cantidad y calidad (sales y nitrato) del agua circulante por el desagüe D-XIX-6. Para ello, se instaló en el punto final del desagüe una estación de aforos equipada con un limnígrafo electrónico (Thalímedes, OTT Messtechnik GMBH & KG, Alemania) y un tomamuestras automático de agua (ISCO 3700 C, Teledyne ISCO Inc. USA).

El limnígrafo electrónico se configuró para la lectura de alturas de agua (h) cada 15 minutos. Dichas lecturas fueron introducidas en la curva de gasto del aforador para obtener caudales (Q) según la ecuación:

$$Q\ (m^3/s) = 1{,}728 \cdot [h\ (m) + 0{,}003469]^{1{,}624}$$

El tomamuestras fue programado para la toma automática de una muestra de agua diaria. Dichas muestras se recogieron cada 21 días transportándose al laboratorio dónde fue determinada la conductividad eléctrica a 25ºC (CE) y su concentración en nitratos ($[NO_3^-]$, por colorimetría con el equipo Autoanalizer 3).

Además, en varias muestras de agua del desagüe D-XIX-6 se determinó el residuo seco (RS) y la concentración en bicarbonato ($[HCO_3^-]$) necesaria para la estimación del Total de Sólidos Disueltos (TDS) como:

$$TDS\ (mg/l) = RS\ (mg/l) + 1/2\ HCO_3^-\ (mg/l);$$

(Custodio y Llamas, 1983).

La ecuación de transformación de CE a TDS fue la siguiente:

$$TDS\ (mg/l) = 749 \cdot CE\ (dS/m) + 41\ ;\ R^2 = 0{,}96$$

Índices de manejo del riego

Para evaluar el uso del agua en la cuenca se ha calculado en cada parcela cultivada y durante el ciclo vegetativo de los cultivos los índices de Eficiencia del Uso Consuntivo del Agua (EUCA) y el Déficit Hídrico (DH).

La EUCA se define como el porcentaje de agua realmente evapotranspirada (ET_R) por los cultivos sobre el agua total disponible para dicha evapotranspiración (riego-R, precipitación-P y agua útil-$AU_{inicial}$ presente en el suelo al inicio del ciclo vegetativo). Este índice hace referencia al grado de aprovechamiento del agua disponible por los cultivos. El DH se define como el porcentaje de agua potencialmente evapotranspirable y que no lo hizo por la ausencia de agua útil en el suelo, sobre el agua potencialmente evapotranspirable. El DH evalúa en qué grado las necesidades hídricas de los cultivos han sido insatisfechas.

$$EUCA = \frac{ET_R}{\left(R + P + AU_{inicial}\right)} \cdot 100; \qquad DH = \frac{ET_C - ET_R}{ET_C} \cdot 100$$

Estos índices dependen de factores naturales (clima y suelo) y antrópicos. Si las lluvias no superan la capacidad de campo de los suelos (drenaje nulo) y no son importantes en los últimos días del ciclo del cultivo, un manejo "ideal" del riego permitiría obtener una EUCA del 100% y un DH del 0%.

Finalmente, se calculó la fracción de drenaje del riego (FD_R), definida como el volumen de agua drenado a causa del riego ($D_R = \sum D$ de cada parcela solo los días de riego), respecto al volumen de riego aplicado (R). Este índice hace referencia a la "pérdida" de agua de riego por percolación profunda, de manera que en una zona con bajas necesidades de lavado, un manejo eficiente del riego vendrá determinado por valores de FD_R bajos.

$$FD_R = \frac{D_R}{R} \cdot 100$$

Índice de manejo del nitrógeno

La eficiencia en la fertilización nitrogenada de la cuenca (EN) se calculó mediante la relación entre las necesidades teóricas de fertilización nitrogenada de los cultivos (NF) y el nitrógeno aplicado por los agricultores (NA).

$$EN = \frac{NF}{NA} \cdot 100$$

El nitrógeno aplicado a cada parcela se obtuvo de encuestas realizadas a la totalidad de los agricultores de la cuenca mientras que las necesidades de fertilización nitrogenada se obtuvieron a partir de las extracciones de N de cada cultivo y las medias productivas en Aragón (Orús *et al.*, 2001). Para los cultivos de alfalfa y guisante, dado que son capaces de fijar simbióticamente nitrógeno, se consideró que sus necesidades de fertilización fueron de 30 y 20 kg N/ha que se corresponde con los valores máximos permitidos por la legislación vigente para la aplicación de fertilizante nitrogenado en las zonas vulnerables a la contaminación por nitratos de Aragón (BOA, 2004). Aunque el índice no tiene en cuenta aspectos tales como el N acumulado en el suelo, el introducido con el agua de riego etc., se considera que es un índice adecuado para los objetivos de este estudio.

Resultados y discusión

Balance de agua en el suelo

El riego supuso la mayor entrada de agua a la cuenca en los dos años estudiados (tabla 1). La dosis de riego media para toda la cuenca en 2005, fue un 49% inferior a la de 2001 (570 mm frente a 1.112 mm). Esta importante diferencia se debió en gran medida a la obligada distribución de cultivos provocada por la sequía.

Tabla 1. Balance de agua en el suelo durante los años hidrológicos 00/01 y 04/05. Entradas de agua por riego (R) y precipitaciones (P). Salidas de agua por evapotranspiracion real (ET_R) y drenaje (D). Incremento de agua en el suelo entre el momento inicial (1 de octubre) y final (30 de septiembre) de cada balance (ΔA)

Table 1. Soil water balance during hydrological years 00/01 and 04/05. volume of irrigation (R), precipitation (P), actual evapotranspiration (ET_R), drainage (D), and the difference between inputs and outputs (ΔA)

Año	Entradas				Salidas				Ent-Sal	
	R		P		ET_R		D		ΔA	
	dam³	mm	dam³	mm	dam³	mm	dam³	mm	dam³	mm
00/01	1.055	1.112	499	526	816	860	717	755	22	23
04/05	539	570	200	211	629	665	155	164	-45	-48

En la alfalfa, cultivo mayoritario en ambos años, se aplicó una media de 13.949 m³/ha en 11 riegos en 2001, mientras que en 2005, la dosis de riego media fue de tan solo 9.224 m³/ha, distribuida en 8 riegos. Con ello, el volumen unitario por riego en 2005

(1.153 m^3/ha·riego) fue un 9% inferior al de 2001 (1.268 m^3/ha·riego). En cambio para el maíz, se aplicó el mismo número de riegos en ambos años (8 riegos), no obstante, la dosis de riego media en 2005 (8.199 m^3/ha) fue un 21% inferior a la aplicada en 2001 (10.363 m^3/ha). Estos datos indican, tanto para la alfalfa como para el maíz, que en 2005 se redujo el volumen de riego unitario aplicado. Además, en 2005, los agricultores decidieron espaciar más la frecuencia de riego y prescindir de aplicar los últimos riegos a la alfalfa sacrificando el último corte en pro de salvar la cosecha de maíz.

El agua aportada con la lluvia fue en ambos años del orden de la mitad del agua aportada con el riego, no obstante, la precipitación en 04/05 se redujo un 60% respecto a la del 00/01.

En cuanto a las salidas, la evapotranspiración fue el componente que más contribuyó en ambos años. En 04/05 la evapotranspiración de agua en la cuenca se redujo en un 23% (de 860 mm a 665 mm) respecto a la estimada en 00/01. La presencia en 04/05 de cultivos con menores demandas hídricas fue contrarrestada por la mayor ET_0 de este año (1.093 mm frente a 1363 mm) provocando una ET_C similar a la del 00/01 (880 frente a 882 mm). Así pues, la disminución en la ET_R de 04/05 frente a la de 00/01 estuvo condicionada principalmente por un mayor déficit hídrico en los suelos.

La diferencia en el volumen de agua drenada entre ambos años fue todavía mayor. Así pues, el drenaje en 04/05 (164 mm) fue un 78% inferior al presentado en 00/01 (755 mm) debido principalmente a la considerable reducción de los volúmenes introducidos con el riego y la lluvia.

La escasa diferencia estimada entre las entradas y salidas (23 y -48 mm) respecto al valor del resto de componentes del balance demuestran que en un balance anual de este tipo, el error de estimar la humedad del suelo inicial como la mitad de la CRAD del suelo no es significativo, y por tanto, justifica la no medición de la humedad inicial de los suelos de cada parcela.

Calidad del riego

La EUCA en el 04/05 fue del 79% frente al 56% de 00/01, es decir, en 04/05 un mayor porcentaje del agua disponible para los cultivos fue utilizada por los mismos en la evapotranspiración. Este porcentaje se ha visto incrementado en parte a causa de que los cultivos han sido llevados hasta condiciones de mayor estrés hídrico (riego deficitario), de manera, que en 04/05 el DH medio de la cuenca se situó en un 23% frente a tan solo el 3% de 00/01. Como caso extremo en 2005, cabe resaltar una parcela de guisante que no se llegó a regar (EUCA= 99,8%, DH= 68%). En el lado opuesto, ese mismo año la parcela mejor regada se correspondió con una parcela de alfalfa sobre suelo aluvial que apenas obtuvo un DH del 6% y su EUCA ascendió al 96%. El escaso DH de esta parcela de alfalfa sobre suelo aluvial (DH= 6%) contrasta con el superior DH del resto de parcelas de alfalfa situadas sobre suelos de saso (DH= 21%) dejando patente la importancia del factor suelo. Además, para este mismo año, el DH medio de las parcelas de maíz sobre suelos de saso fue inferior (14%) demostrando las preferencias de los agricultores por salvar la cosecha del maíz a costa de pérdidas relativas en la producción anual de alfalfa.

Afortunadamente, el cambio del sistema de riego por inundación a turnos por el sistema de riego por inundación a la demanda posibilitó un mayor margen de acción a los agricultores, de tal forma que a pesar de la escasez de agua, en 04/05 incrementaron la frecuencia de riego en las parcelas de maíz en suelos de saso de cada 14 días en 2001 a cada 13 días en 2005. En este mismo año, mantuvieron unos intervalos entre riegos más altos para las parcelas de alfalfa sobre

suelos de saso (cada 16 días) y todavía mayores si la alfalfa se encontraba en suelos de aluvial (cada 19 días).

La FD_R en los dos años de estudio presentó una evolución paralela (fig. 2). En plena campaña de riego (de junio a septiembre) la FD_R alcanzó sus valores mínimos (44% en 00/01 y 21% en 04/05) indicativo de que los riegos en este periodo son más eficientes que los dados al principio de la campaña. Éste hecho se debe a que durante el verano, previo a cada riego, el suelo contiene muy poca agua disponible para las plantas y por ello la dosis de riego aplicada por inundación, siempre por encima de la CRAD de los suelos, es acumulada en el suelo en mayor proporción que para los riegos del resto del año, cuando el suelo está más húmedo y al regarlo alcanza antes su capacidad de campo. Además, en primavera se aplicaron riegos de presiembra y/o nascencia al maíz que no tienen por objeto suministrar agua al cultivo y por tanto su uso consuntivo es ineficiente. No obstante, y aunque el agricultor no puede influir ilimitadamente sobre las dosis de riego aplicadas por inundación, en 04/05 se ha detectado una mejora en el ajuste de las dosis de agua aplicada en cada riego ya que la FD_R media de 04/05 frente a 00/01 disminuyó del 50 al 31%.

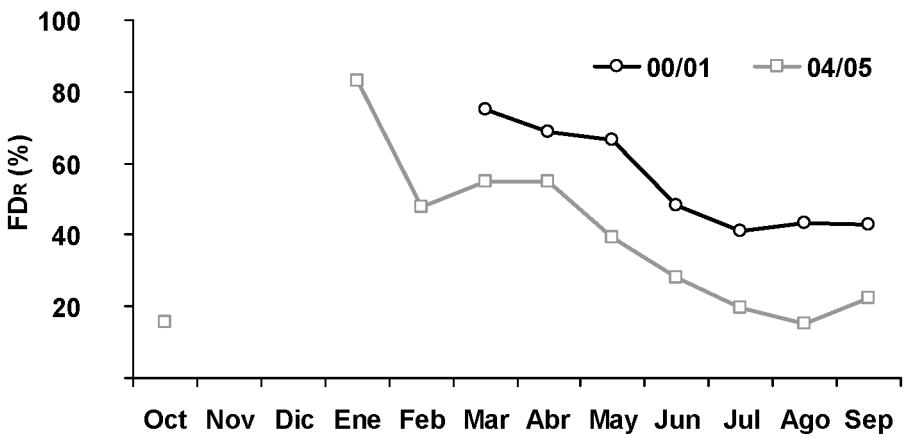


Figura 2. Fracción de drenaje del riego (FD_R, %) mensual para los años de estudio 00/01 y 04/05 en la cuenca drenante del desagüe D-XIX-6.

Figure 2. Monthly drainage irrigation fraction (FD_R, %) in D-XIX-6 basin in 00/01 and 04/05 hydrological years.

Cantidad y calidad del agua de drenaje

El volumen de agua contabilizado en la estación de aforos fue sensiblemente superior al estimado por BAS en los dos años de estudio. Así pues, el drenaje estimado con BAS en 00-01 fue un 67% del contabilizado en la estación de aforos, mientras que en 04/05 tan solo fue el 32% del medido. Este hecho, queda justificado por la hidrogeología de la cuenca ya que sus límites superiores se disponen sobre un glacis, donde el acuífero asociado a él, aporta flujos subterráneos externos posteriormente drenados por el desagüe. Es decir, el desagüe no solo esta drenando el agua introducida en la cuenca por el riego y la lluvia sino también

agua y contaminantes procedentes del exterior e introducidos a través del acuífero.

Conocedores de esta circunstancia, en verano de 2005 se procedió a la instalación de una red de piezómetros en la cuenca de tal forma que en posteriores estudios podamos estimar la entrada de sales y contaminantes en flujos subterráneos y con ello, cerrar balances de masas que permitan asignar cargas unitarias de contaminantes exportados en el drenaje de la cuenca. A pesar de no haberse podido obtener en este estudio valores unitarios de agua y contaminantes exportados, la comparación de la evolución temporal de la cantidad y calidad del agua circulante por el desagüe D-XIX-6 ofrece una información muy interesante (fig. 3).

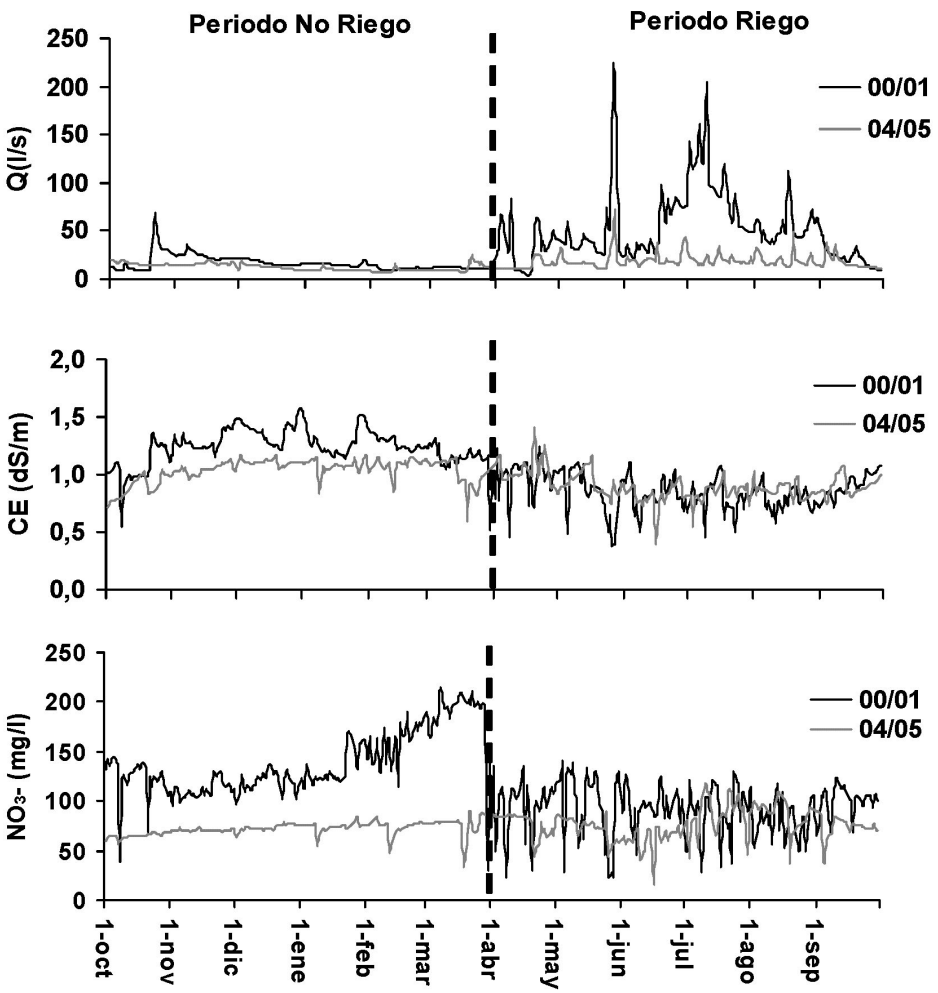


Figura 3. Evolución del Caudal (l/s), de la CE (dS/m) y la [NO_3^-] (mg/l) anual para los años de estudio 00/01 y 04/05 en la cuenca D-XIX-6.

Figure 3. Daily flow (Q, l/s), electrical conductivity (CE, dS/m) and nitrate concentration (NO_3^-, mg/l) in the D-XIX-6 ditch during the hydrological years 00/01 and 04/05.

Prácticamente durante todo el año hidrológico 04/05 se presentaron caudales más bajos que en el año 00/01, de tal forma, que el caudal medio en 04/05 (15 l/s) fue inferior a la mitad del presentado en 00/01 (34 l/s), condicionado principalmente, por los menores caudales del periodo de riego (51 l/s en 2001 por 18 l/s del año 2005). En ambos años los caudales del periodo de riego (51 y 18 l/s) fueron superiores a los de no riego (17 y 12 l/s), no obstante, las diferencias del caudal entre ambos periodos en 04/05 (6 l/s de diferencia) fueron muy inferiores a las de 00/01 (34 l/s de diferencia).

La CE evolucionó condicionada por las variaciones de caudal (fig. 3). Ambos años, las CE del periodo de no riego (1,26 dS/m en 00/01 y 1,02 dS/m en 04/05) fueron mayores que la CE del periodo de riego (0,81 dS/m en 00/01 y 0,89 dS/m en 04/05). No obstante, la CE del periodo de no riego de 04/05 (1,02 dS/m) fue menor que la del periodo de no riego de 00/01 (1,26 dS/m), mientras que en el periodo de riego ocurrió lo contrario (0,81 dS/m en riego de 2001 frente a 0,89 dS/m en riego de 2005). En el computo anual, la CE media ponderada por caudales del año 04/05 (0,94 dS/m) fue ligeramente superior a la del año 00/01 (0,92 dS/m). Este hecho es coherente con la mayor EUCA del año 04/05, que provoca retornos de riego de una mayor salinidad, menores volúmenes de drenaje y una menor masa de sales exportada en el drenaje (360 t en 04/05 frente a las 779 t de 00/01, tabla 2).

Tabla 2. Drenaje estimado por BAS (D_{BAS}), drenaje medido en la estación de aforos (D_{AFORO}), Eficiencia en el Uso Consuntivo de Agua (EUCA), Conductividad eléctrica del agua de drenaje (CE), masa de sales exportada en el drenaje (S), Necesidades de fertilización nitrogenada (NF),Nitrógeno aplicado en la fertilización nitrogenada (NA), Eficiencia en la aplicación de nitrógeno (EN), concentración de nitrato del agua del drenaje ($[NO_3^-]$) y masa de nitrógeno exportada en el drenaje (N) durante los dos años hidrológicos de estudio (00/01 y 04/05) en el desagüe D-XIX-6.

Table 2. Drainage estimated by BAS (D_{BAS}), drainage measured in D-XIX-6 ditch (D_{AFORO}), Consumptive Water Use Efficiency (EUCA), Electrical Conductivity (CE), Salt load (S), necessities of nitrogen fertilization (NF), nitrogen applied by the farmers (NA), Nitrogen fertilization Efficiency (EN), nitrate concentration ($[NO_3^-]$, and nitrogen load exported (N) by D-XIX-6 ditch during 00/01 and 04/05 hydrological years

Año	D_{BAS} dam^3	D_{AFORO} dam^3	EUCA %	CE dS/m	S t	NF kg N/ha	NA kg N/ha	EN %	$[NO_3^-]$ mg/l	N t
00/01	1.055	1.112	499	526	816	860	717	755	22	23
04/05	539	570	200	211	629	665	155	164	- 45	- 48

En cuanto a la $[NO_3^-]$, prácticamente la totalidad del año 04/05 presentó valores inferiores a los registrados en 00/01 (fig. 3). Las diferencias fueron más acusadas en periodo de no riego principalmente ocasionadas por los elevados valores presentados en 00/01. Así pues, mientras en el periodo de no riego de 00/01 la $[NO_3^-]$ media fue de 131 mg/l, en ese mismo periodo en 04/05, la $[NO_3^-]$ media tan solo fue de 71 mg/l. En cambio, en la estación de riego, aun siendo menor la $[NO_3^-]$ de 2005, las $[NO_3^-]$ medias fueron más parecidas (85 mg/l en 2001 frente a los 75 mg/l de 2005).

Al igual que ocurre con la CE, es destacable que mientras en 00/01 la [NO_3^-] de la estación de no riego (131 mg/l) fue mayor que la de riego (85 mg/l), en 04/05 ocurrió lo contrario (71 mg/l en la estación de no riego por 75 mg/l en la de riego). Así, en 2001 la aplicación de riegos ineficientes con agua de buena calidad produjo una dilución del agua de drenaje mientras que en 2005 no. Así, los máximos valores de concentración en 04/05 se identifican el 9 y 26 de julio (fig. 3), coincidiendo con la aplicación del abonado de cobertera por fertirriego en las dos únicas parcelas de maíz de la cuenca. A partir de entonces los picos de máximos no alcanzan valores tan altos ya que el nitrato acumulado en el suelo disponible para ser lixiviado se fue reduciendo.

En 04/05 las necesidades de fertilización de los cultivos en la cuenca fueron un 37% inferiores (145 kg N/ha en 00/01 frente a 91 kg N/ha en 04/05) y las dosis de abonos nitrogenados aplicados se ajustaron más a las necesidades (EN en 00/01 fue del 62% frente al 72% de 04/05). Con ello y la disminución del volumen de drenaje a consecuencia del menor volumen de riego-lluvia y la mayor EUCA provocó que el agua de drenaje tuviese una [NO_3^-] un 23% inferior (96 mg/l en 00/01 frente a 74 mg/l en 04/05) y se exportara un 65% menos de N-NO_3^- en el drenaje (23 t en 00/01 frente a 8 t en 04/05).

A pesar de que en 04/05 los agricultores ajustaron mejor las dosis de cada riego ($FD_{R\text{-}00/01}$= 50% > $FD_{R\text{-}04/05}$= 31%) aumentando considerablemente la EUCA ($EUCA_{00\text{-}01}$= 56% < $EUCA_{04\text{-}05}$= 79%), no se realizó un manejo adecuado del riego ya que los cultivos sufrieron un mayor DH ($DH_{00\text{-}01}$= 3% < $DH_{04\text{-}05}$= 23%).

El estudio indica que el cambio a riego a la demanda flexibilizó el calendario de riego permitiendo priorizarlo según las necesidades hídricas de los cultivos en función del suelo y la productividad de los cultivos. No obstante, los agricultores se vieron superados por la extrema sequía que además de condicionar la implantación de cultivos con menores necesidades hídricas hubiese requerido la aplicación de riegos más frecuentes.

En el año 04/05 se exportó un 54% menos de sales (779 t en 00/01 *vs.* 360 t en 04/05) y un 65% menos de N-NO_3^- (23 t en 00/01 *vs.* 8 t en 04/05) a través del drenaje del desagüe D-XIX-6, y sus aguas presentaron mayor CE (0,92 dS/m en 00/01 *vs.* 0,94 dS/m en 04/05) y menor [NO_3^-] (96 mg/l en 00/01 *vs.* 74 mg/l en 04/05).

El menor impacto medioambiental del año 04/05 estuvo influenciado por un manejo agronómico más adecuado (mayor eficiencia de riego y de aplicación de fertilizantes). No obstante, el condicionamiento climático enmascara la eficacia de los cambios en la gestión del riego propuestos por la comunidad de regantes y por ello se recomienda la continuidad de este estudio.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a la subvención que otorgó el Gobierno de Aragón para la realización de actividades de formación y transferencia de tecnología agraria (Convocatoria 2005), y a la colaboración de la Comunidad de Regantes nº V de Bardenas y sus agricultores.

Referencias

Allen R, Pereira L, Raes D, Smith M, 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper nº 56. FAO. Roma (Italia). 300 pp.

Boletín Oficial de Aragón, 2004. Orden por la que se designan nuevas zonas vulnerables a la contaminación de las aguas por los nitratos de

fuentes agrarias en la Comunidad Autónoma de Aragón y se aprueba el Programa de Actuación sobre las mismas (BOA nº 91 del 4 de agosto de 2004).

Causapé J, 2003. Repercusiones medioambientales de la agricultura sobre los recursos hídricos de la comunidad de regantes nº V de Bardenas (Zaragoza). Eds. Fundación Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes. Universidad de Alicante. http://www.cervantesvirtual.com. 153 pp.

Causapé J, García MA, Quílez D, Aragüés R, 2004. Eficiencia e impacto medioambiental de los regadíos de la cuenca del Ebro. Revisión bibliográfica. Actas del XXII Congreso Nacional de Riegos y Drenajes de Logroño. Asociación Española de Riegos y Drenajes (AERYD). 75-77.

CHE, 2004. Revisión de las necesidades hídricas netas de los cultivos de la cuenca del Ebro. Documento Interno. 111 pp.

Custodio E, Llamas M, 1983. Hidrología Subterránea. Ediciones Omega. 2.290 pp.

Orús F, Quílez D, Betrán J, 2001. El código de buenas prácticas agrarias (I). Fertilización nitrogenada y contaminación por nitratos. Gobierno de Aragón. Informaciones Técnicas nº 93. 39 pp.

(Aceptado para publicación el 17 de noviembre de 2006)