

**J. Causapé**

**SALES Y NITRATO EXPORTADOS EL DRENAJE DE LOS REGADÍOS  
DE BARDENAS**

Separata ITEA

INFORMACIÓN TÉCNICA ECONÓMICA AGRARIA, VOL. **105** N.º 4 (257-271), 2009

## Sales y nitrato exportados el drenaje de los regadíos de Bardenas

J. Causapé

Instituto Geológico y Minero de España (IGME)  
C/ Manuel Lasala nº 44. 9ºB. 50006 Zaragoza  
Tf: 34 - 976 555 282, Fax: 34 - 976 55 33 58  
E-mail: j.causape@igme.es; web site: www.jcausape.es

### Resumen

Cuantificar la evacuación de contaminantes agrarios a través del agua drenaje en zonas regadas permite asignar esa pérdida a la superficie de regadío de la que proviene. Ello resulta imprescindible para la aplicación de una legislación basada en máximos permisibles de masas de contaminantes exportados. Como continuación a la evaluación del aprovechamiento del agua, esta segunda parte del estudio pretende evaluar la contaminación inducida por las 59.200 ha regadas de Bardenas incluidas en la cuenca del Arba.

Para ello, se ejecutaron balances de masas (sales y nitrato) asignando valores de concentración a cada uno de los componentes del balance hídrico en el periodo 2004-2007. Asimismo, se analizó la evolución de índices de contaminación por sales (ICS) y nitrato (ICN) que corrigen la masa de contaminantes exportada por la salinidad y necesidades de fertilización del regadío estudiado.

Los ICS e ICN disminuyeron de 2004 a 2007 un 15% y un 23% respectivamente, situándose por efecto de la reutilización del agua de drenaje, en valores un 60% inferior a los obtenidos en pequeñas cuencas del mismo regadío. El ICS fue similar al de modernos regadíos bien gestionados aunque el ICN fue un 24% superior.

Los resultados indicaron escasas posibilidades de disminuir más la contaminación por sales pero una necesidad de adecuar el manejo combinado del riego y fertilización de tal forma que se minimice la contaminación por nitratos, algo que en Bardenas no es fácil de conseguir por la presencia mayoritaria de suelos inadecuados para el riego por inundación que no permite un control suficiente de las fechas-dosis de agua y nitrógeno a aplicar.

**Palabras clave:** Vigilancia agroambiental, regadío, índices, contaminación, agua.

### Summary

#### Salts and nitrates exported in the Bardenas drainage

The loss of agricultural pollutants through drainage can be related to the irrigated land of the hydrological basin and therefore it is possible to establish a legislation based on maximum allowed values of pollutant exported loads.

As a continuation of the evaluation of water use, this second part of the study evaluates the contamination induced by the 59.200 ha of irrigated land in the Bardenas irrigation district, which belongs to the Arba basin.

Mass balances (salt and nitrate) were accomplished, assigning concentration values to each one of the water balance components in the period 2004-2007. The Salt Contamination Index (ICS) and the Nitrate Contamination Index (ICN) were analyzed; these indices correct the unitary mass of pollutants exported by the salinity and fertilization needs of the studied irrigated land.

The ICS and ICN decreased, respectively, 15% and 23% from 2004 to 2007, as an effect of the drainage water reuse, these indices presented values 60% lower than the ones obtained in small basins of the

same Irrigation District. The ICS values were similar to the new irrigation lands with good management, but the ICN values were 24% higher.

The results showed little possibilities to reduce the salt contamination as well as the necessity to adequate the combination of irrigation and fertilization management, as a way to minimize the nitrates pollution. This will not be easy to achieve in Bardenas because of the presence of inadequate soils for flood irrigation, which does not allow sufficient control of the application of water and nitrogen.

**Key words:** Agro-environmental monitoring, irrigation, indices, pollution, water.

## Introducción

Una agricultura de regadío sostenible exige, entre otras cosas, que las sales no queden acumuladas en los suelos impidiendo el desarrollo normal de los cultivos, por lo que es necesaria su evacuación produciendo un incremento en la salinidad de los sistemas receptores (ríos y acuíferos).

Los cambios que sufre el agua en la composición química por su evapoconcentración y la disolución de sales presentes en el suelo, pueden llegar a ser tan importantes como para no permitir su uso posterior en otras actividades agrarias, industriales, urbanas o ecológicas (Jiménez y Lamo de Espinosa, 1998).

La Agencia Estadounidense de Protección del Medioambiente identifica a la agricultura como la principal fuente de contaminación de las aguas ([www.epa.gov](http://www.epa.gov)). Mención especial merece la contaminación inducida por nitratos de origen agrario ya que la Organización Mundial de la Salud identifica como un problema muy importante la presencia de nitratos derivados de la fertilización nitrogenada en las aguas superficiales y subterráneas (OMS, 2004).

La necesidad de producir mayores cantidades de alimentos fomentó la aplicación de fertilizantes minerales nitrogenados para aumentar las cosechas hasta alcanzar los rendimientos deseados (Betrán, 2006). Pero las altas tasas de nitrato en ríos o mares también está causando graves efectos medioam-

bientales, provocando la aparición de zonas anóxicas y la eutrofización de los medios acuáticos, como se evidencia en las costas de los Estados Unidos (Scavia y Bricker, 2006) o China (Wang, 2006).

Así pues, la contaminación de los ecosistemas acuáticos receptores de retornos de riego es un problema creciente en muchos países ante la implantación de mayores áreas destinadas a la agricultura de regadío (FAO, 2002).

La legislación europea actual en materia de aguas tan solo hace referencia a niveles de contaminación basados en concentración de contaminantes (EU, 1998) y no en la masa exportada a través del drenaje, que es verdaderamente el parámetro que se debe controlar para minimizar las afecciones medioambientales negativas hacia los ecosistemas acuáticos que se desee proteger. Este vacío legal esta justificado en parte, por la particularidad que entraña el carácter difuso de la contaminación inducida por el regadío, y por tanto, por su dificultad para cuantificarla y atribuirla a un determinado territorio. Sin embargo, una vez comprobado el adecuado cierre del balance hídrico de una cuenca hidrológica que confirme la consideración de todos los componentes y su correcta medición, la pérdida de contaminantes agrarios a través de su drenaje puede ser asignada al regadío incluido en dicha cuenca y con ello, aplicar una legislación basada en máximos permisibles de masas de contaminantes exportados en relación con las características

particulares de cada regadío (clima, geología y agronomía).

El seguimiento de cuencas hidrológicas de regadío se ha aplicado con éxito en pequeñas cuencas del valle del Ebro donde los principales problemas de contaminación agraria son los derivados de la salinización y elevada concentración de nitrato en las aguas (Causapé *et al.*, 2006). Las masas de sales exportadas por los regadíos del Ebro son ampliamente variables oscilando entre las 4 t/ha·año en suelos no salinos de zonas como Bardenas I (Causapé *et al.*, 2004) y las 20 t/ha·año en los suelos con abundante yeso y regados por inundación en Monegros I (Isidoro *et al.*, 2006a).

En cuanto al nitrato, la masa exportada por los regadíos del Ebro oscila entre los 30 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/ha·año (Cavero *et al.*, 2003) en zonas con alta eficiencia del riego y de aplicación de fertilizantes nitrogenados y los casi 200 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/ha·año (Causapé *et al.*, 2004) en casos contrarios, pudiendo desperdiciarse hasta la mitad del fertilizante nitrogenado aplicado.

Como continuación a la evaluación del aprovechamiento del agua en Bardenas (Causapé *et al.*, 2009), esta segunda parte pretende: i) cuantificar la masa de contaminantes agrarios (sales y nitrato) exportados por los regadíos de Bardenas incluidos en la cuenca del Arba (59.200 ha); ii) analizar los factores más influyentes sobre la masa de contaminantes exportada y iii) evaluar la contaminación inducida por el regadío.

## Metodología

Tanto la descripción del área de estudio como el desarrollo de los balances de agua previos a esta segunda parte se presentan en la primera parte del trabajo (Causapé *et al.*, 2009).

En esta segunda parte, se continuó el estudio mediante la ejecución de balances de masas de los principales contaminantes de origen agrario de la cuenca del Ebro. Con la ayuda de la aplicación informática EMR (Evaluador agroambiental de Regadíos; Causapé, 2008) se asignaron valores de concentración de sales y nitrato a cada uno de los componentes del balance hídrico (2004-2007), excepto a la evapotranspiración y a las pérdidas por evaporación y arrastre por el viento del riego por aspersión que se consideraron libres de contaminantes. El producto entre concentraciones y volúmenes de agua otorgó la masa de sales y nitrato para cada componente del balance.

La diferencia entre las entradas (E: P-Precipitación, R-Riego, EL-agua destinada a generar electricidad y posteriormente vertida al Arba sin uso para riego, AP-abastecimiento a pequeñas poblaciones, DP-vertido de la depuradora, agua por los ríos RI-Riguel, AL-Arba de Luesia, AB-Arba de Biel y RS-Resto del secano) y salidas (S: AT-Arba en Tauste, AC-Acequias laterales, SB-Flujos subterráneos) se atribuyeron al resultado de los componentes no tenidos en cuenta y a los errores asociados al balance. Así pues, los balances de masas estuvieron descritos por la siguiente ecuación:

$$(P+R+EL+AP+DP+RI+AL+AB+RS) - (AT+AC+SB) = E - S \quad [\text{Ec. 1}]$$

La masa de sales (D<sub>S</sub>) y nitrato (D<sub>N</sub>) exportada a través del drenaje propio del sistema se calculó como:

$$DS/N = (AT+AC+SB) - (EL+AP+DP+RI+AL+AB+RS) \quad [\text{Ec. 2}]$$

La conductividad eléctrica a 25° (CE) y la concentración de nitrato ([NO<sub>3</sub><sup>-</sup>]) de P fue estimada mensualmente a partir de los valores medios registrados en el periodo 1988-2000 en la estación que el European Monitoring and Evaluation Program (EMEP, 2008) tiene en Logroño. Los Sólidos Disuel-

tos Totales (SDT) para este componente fueron estimados indirectamente a través de la relación generalmente aceptada:

$$\text{SDT (mg/l)} = 640 \cdot \text{CE (dS/m)} \\ \text{(Bower y Wilcox, 1965)}$$

La concentración del agua del canal de Bardenas se aplicó a R, EL, y AP. Se tomaron 9 muestras de agua en las que se determinó la CE y  $[\text{NO}_3^-]$  además del residuo seco y la concentración de bicarbonato ( $[\text{HCO}_3^-]$ ) necesarios para la estimación de los SDT.

$$\text{SDT (mg/l)} = \text{Residuo Seco (mg/l)} + \\ + \frac{1}{2} \text{HCO}_3^- \text{ (mg/l)}; \text{ (Custodio, 1983) [Ec. 3]}$$

Como la salinidad y concentración de nitrato del agua del Canal de Bardenas fue muy constante ( $\text{CV}_{\text{SDT}} = 9\%$ ), se optó por introducir durante todo el periodo del balance los valores medios de las 9 muestras analizadas ( $\text{SDT} = 275 \text{ mg/l}$ ,  $[\text{NO}_3^-] = 2 \text{ mg/l}$ ).

En cambio, para RI, AL y AB de mayor variabilidad temporal ( $\text{CV}_{\text{RI}} = 47\%$ ,  $\text{CV}_{\text{AL}} = 21\%$ ,  $\text{CV}_{\text{AB}} = 21\%$ ) se estableció la relación CE (dS/m) vs. SDT (mg/l) y fue aplicada a muestreos trimestrales donde únicamente se determinó la CE y  $[\text{NO}_3^-]$ .

$$\text{SDT}_{\text{RI}} = 769 \cdot \text{CE}_{\text{RI}} - 1; \\ n = 11; R^2 = 0,99 \quad \text{[Ec. 4]}$$

$$\text{SDT}_{\text{AL}} = 639 \cdot \text{CE}_{\text{AL}} + 74; \\ n = 10; R^2 = 0,93 \quad \text{[Ec. 5]}$$

$$\text{SDT}_{\text{AB}} = 819 \cdot \text{CE}_{\text{AB}} - 31; \\ n = 10; R^2 = 0,92 \quad \text{[Ec. 6]}$$

La CE y  $[\text{NO}_3^-]$  de RS se estimó como la media de RI, AL, y AB (cuencas mayoritariamente de secano). La concentración de DP fue facilitada mensualmente por el Instituto Aragonés del Agua (Gobierno de Aragón).

La importancia y variabilidad de la concentración de AT condicionó la instalación de un tomamuestras automático (ISCO 3700C) que posibilitó una frecuencia de muestreo diaria y el posterior análisis en laboratorio

de la CE y  $[\text{NO}_3^-]$ . La relación CE-SDT se estableció a partir de 27 muestras:

$$\text{SDT}_{\text{AT}} = 711 \cdot \text{CE}_{\text{AT}} - 20; \\ n = 27; R^2 = 0,99 \quad \text{[Ec.7]}$$

Para el resto de componentes de salida se realizó un menor esfuerzo de muestreo. Así, a AC se asignó la concentración media de 3 muestras tomadas en la acequia ( $\text{SDT} = 850 \text{ mg/l}$ ;  $[\text{NO}_3^-] = 25 \text{ mg/l}$ ) y a SB la concentración media de 3 muestras tomadas en un manantial cercano a la estación de aforos del Arba en Taus-te ( $\text{SDT} = 1.758 \text{ mg/l}$ ;  $[\text{NO}_3^-] = 61 \text{ mg/l}$ ).

El impacto agroambiental se cuantificó en base a los Índices de Contaminación por Sales (ICS) y por nitrato (ICN) propuestos por Causapé (2008). Ambos índices dividen las masas unitarias de contaminantes exportados por factores hasta cierto punto de influencia "natural" como son la geología y las posibilidades agronómicas de un determinado regadío.

Así, el ICS se define como la relación entre sales exportadas ( $D_s$ ) y la CE media del drenaje en periodo de no riego ( $\text{CE}_{\text{NR}}$ ), parámetro representativo de la salinidad de los materiales geológicos de la zona. Por otro lado, el ICN se calculó como el nitrato exportado en el drenaje ( $D_N$ ) entre las necesidades de fertilización nitrogenada del sistema (NF).

$$\text{ICS} = \frac{D_s}{\text{CE}_{\text{NR}}} \quad \text{[Ec. 9]}; \quad \text{ICN} = \frac{D_N}{\text{NF}} \quad \text{[Ec.10]}$$

Las NF se calcularon anualmente a partir de las superficies de cultivos, las producciones medias de la zona (Estadística agraria. [www.aragon.es](http://www.aragon.es)) y las extracciones de nitrógeno en las cosechas (Orús y Sin, 2006), salvo para las leguminosas que por su capacidad de fijar simbióticamente el nitrógeno se consideró  $\text{NF} = 0$ .

## Resultados

### Sales

A pesar de que el agua del canal de Bardenas fue de baja mineralización (275 mg/l), el 60% de las sales introducidas en el sistema lo hicieron a través del agua de riego llegando a constituir el 75% de las entradas de 2005 (tabla 1). Los aportes de sales procedentes del exterior al área regable evaluada (RI, AL, AB, y RS) constituyeron el 25% de las entradas, oscilando entre el 32% del lluvioso año 2004, y tan

sólo el 15% del seco 2005. EL supuso el 8% de las entradas concentrándose únicamente en los años más lluviosos (2004 y 2007). La aportación del resto de entradas fue significativamente inferior (P= 3% AP= 3% y DP= 1%).

En cuanto a las salidas, el 98% se produjeron a través de AT mientras que AC (2%) y SB (1%) tan sólo contribuyeron en un 3%. La CE media de las muestras diarias recogidas en AT fue de 3,04 dS/m (CV= 43%), si bien, una vez ponderadas por el volumen de agua, la CE media de AT fue inferior (2,24 dS/m). Un 90% de las muestras colectadas estuvo por

Tabla 1. Entradas (R-Riego, P-Precipitación, RI-Riguel, AL-Arba de Luesia, AB-Arba de Biel, RS-Resto Secano, EL-agua destinada a generar electricidad y posteriormente vertida al Arba sin uso para riego, AP-Abastecimiento a pequeñas poblaciones, y DP-Depuradora de Ejea), Salidas (AT-Arba en Tauste, AC-Acequias laterales que puentean la estación del Arba en Tauste, SB-flujo subterráneo a través del aluvial del Arba), diferencia entre entradas y salidas del balance de sales desarrollado en el área regable incluida en la cuenca del Arba para los cuatro años de estudio (2004-2007)

*Table 1. Inputs (R-Irrigation, P-Precipitation, RI-Riguel, AL-Arba de Luesia, AB-Arba de Biel, RS-Rainfed land, EL- Water used to generate electricity and then disposed into the Arba river without being used for irrigation, AP-Water supply to small villages, DP- Sewage treatment plant of Ejea), Outputs (AT-Arba Tauste, AC-Lateral channel in Arba Tauste, SB-Groundwater flow through Arba aquifer), difference between inputs and outputs in the salt balance developed in the irrigated area in the Arba basin for the four study years (2004-2007)*

Año		2004	2005	2006	2007	04-07
t/ha·año						
E-ENTRADAS	R	1,46	1,37	1,69	1,43	1,49
	P	0,12	0,05	0,09	0,08	0,08
	RI	0,13	0,03	0,04	0,19	0,10
	AL	0,19	0,01	0,04	0,11	0,09
	AB	0,27	0,05	0,09	0,15	0,14
	RS	0,41	0,18	0,32	0,29	0,30
	EL	0,44	0,00	0,00	0,35	0,20
	AP	0,09	0,11	0,07	0,02	0,07
	DP	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03
S-SALI	AT	7,41	5,69	4,78	5,60	5,87
	AC	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
	SB	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
ΣEntradas (t/ha·año)		3,13	1,83	2,36	2,65	2,49
ΣSalidas (t/ha·año)		7,55	5,84	4,92	5,74	6,01
E – S (t/ha·año)		-4,42	-4,01	-2,56	-3,10	-3,52

encima de 1,5 dS/m oscilando entre 7,48 dS/m (09/07/2006) y 0,54 dS/m (03/04/2007).

La mayor entrada (3,13 t/ha) y salida (7,55 t/ha) de sales al sistema se produjo en el año más lluvioso (2004). En cambio, mientras la menor aportación (1,83 t/ha) se registró el año más seco (2005), la menor salida (4,92 t/ha) se presentó al año siguiente (2006) debido al desfase existente entre las entradas y salidas por la propia regulación hídrica del sistema.

La diferencia entre entradas y salidas de sales fue negativa en los cuatro años de estudio (tabla 1) oscilando entre -4,42 t/ha de 2004 y -2,56 t/ha de 2006. Estas diferencias se debieron al resultado de los procesos de disolución/precipitación, a las sales contenidas en el agua almacenada cada año en el sistema y a los errores del balance.

Teniendo en cuenta que al final de los cuatro años de estudio el desbalance hídrico fue prác-

ticamente nulo (Causapé *et al.*, 2009), la diferencia entre entradas y salidas durante el periodo de estudio (3,52 t/ha-año) pudo asociarse principalmente al predominio de los procesos de disolución de sales sobre los de precipitación.

Del total de sales exportadas (AT+AC+SB), el 85% (5,09 t/ha-año) fueron asociadas al drenaje propio del sistema evaluado. Anualmente, el lluvioso año 2004 registró el mayor  $D_s$  (6,00 t/ha) a consecuencia de la mayor cantidad de sales disueltas (4,42 t/ha), mientras que 2006 (año posterior a la sequía de 2005), presentó el menor  $D_s$  (4,35 t/ha) a pesar de que las sales introducidas con el riego (1,69 t/ha) fueron las mayores de los cuatro años de estudio.

La evolución mensual de  $D_s$  (fig. 1) reflejó cómo partiendo de valores en torno a 0,4 t/ha-mes, las intensas lluvias de septiem-

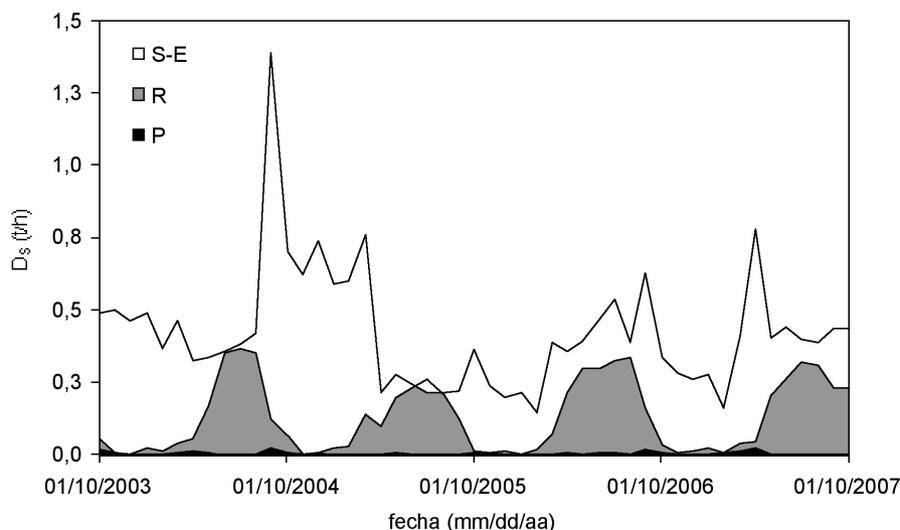


Figura 1. Evolución mensual de las sales exportadas en el drenaje propio del sistema evaluado ( $D_s$ ) y la contribución a éste de las sales introducidas con la precipitación (P), riego (R), y disolución de materiales geológicos (S-E).

Figure 1. Monthly evolution of the salt mass exported by the drainage associated to the evaluated system ( $D_s$ ) and the contribution of salt inputs towards precipitation (P), irrigation (R), and dissolution of geological materials (S-E).

bre de 2004 provocaron un máximo mensual de 1,4 t/ha·mes manteniéndose en valores elevados (en torno a 0,7 t/ha·mes) hasta la campaña de riego de 2005. Entonces, la ausencia de lluvias mermó las dotaciones de riego aplicadas maximizando el aprovechamiento de agua (Causapé *et al.*, 2009) y minimizando la masa de sales exportada (en torno a 0,3 t/ha·mes). Salvo algunos picos producidos por el drenaje de lluvias, los años hidrológicos 2005 y 2006 se comportaron de forma similar alcanzando valores mínimos al final del invierno (en torno a 0,3 t/ha·mes) y máximos en plena campaña de riego (en torno a 0,5 t/ha·mes).

Un 69% de  $D_s$  procedió de la disolución de los materiales geológicos (3,52 t/ha·año), otro 29% tuvo su origen en las sales introducidas con el agua de riego (1,49 t/ha·año) y tan solo el 2% se correspondieron a las sales contenidas en el agua de lluvia (0,08 t/ha·año).

La salinidad del drenaje propio del regadío evaluado (4,8 dS/m) fue más del doble de la medida en AT (2,2 dS/m) mostrando que los componentes no asociados al regadío que confluyeron en el río (RI, AL, AB, RS, EL, AP, y DP) tuvieron un carácter diluidor.

Atendiendo a una  $CE_{NR}$  del regadío evaluado de 3 dS/m (CE media de las muestras de AT tomadas en temporada de no riego), el ICS de 2004 fue de 2 t/ha/dS/m (fig. 2). El ICS disminuyó en 2005 y 2006 que con la menor masa de sales exportada presentó el menor ICS (1,45 t/ha/dS/m).

La evolución anual del ICS acumulado (fig. 2), donde el desfase entre entradas y salidas cada vez toma menos importancia, indicó que desde 2004 existió una disminución del 15% en el ICS acumulado, si bien, el ICS anual de 2007 registró un ligero aumento de 0,08 t/ha/dS/m sobre el de 2006.

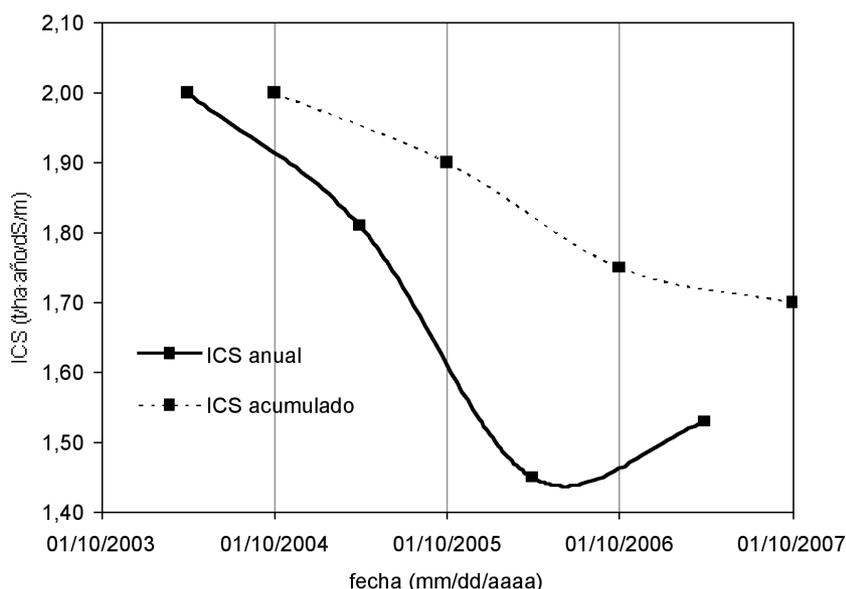


Figura 2. Índice de Contaminación por Sales (ICS) del área regable incluida en la cuenca del Arba en los cuatro años de estudio (2004-2007) y anualmente acumulado.

Figure 2. Salt Contamination Index (ICS) in the irrigated area belonging to the Arba basin, for the four study years (2004-2007) and the yearly accumulated.

La masa de sales exportada por el drenaje de Bardenas (5 t/ha-año) fue ligeramente superior a la cuantificada en pequeñas cuencas menos salinas de este mismo sistema de riegos, lo que se tradujo en un ICS un 65% inferior (tabla 2). Este hecho se debió principalmente a la intensa reutilización del agua de drenaje para el riego, que incrementó un 31% el aprovechamiento de agua en el sistema disminuyendo a su vez la masa de sales exportada. De hecho, otros regadíos de Monegros I con menor salinidad pero inferior aprovechamiento del agua exportaron cuatro veces más de sales y presentaron un ICS siete veces superior (tabla 2).

El ICS del área de estudio (1,7 t/ha-año/dS/m) fue del mismo orden al obtenido en modernos regadíos de Monegros II (1,6 t/ha-año/dS/m), si bien, la masa de sales exportada por estos últimos fue casi tres veces superior porque la cantidad de sales de sus materiales geológicos es casi el triple.

La masa de sales exportada por el área regable de Bardenas incluida en el Arba fue entre 3 y 15 veces superior a subcuencas del Arba en condiciones de secano con más sales

(Cuenca del Barranco de Lerma:  $CE_{NR} = 3,79$  dS/m; Abrahão *et al.*, 2008) o menos sales (Cuenca del Arba de Luesia: AL:  $CE_{NR} = 0,57$  dS/m), arrojando ICS tres veces superiores. No obstante, el escaso margen de incremento del Índice de Aprovechamiento del Agua (IAA; Causapé *et al.*, 2009) indica que escasamente se podrá reducir las sales exportadas de Bardenas, hasta que con el paso del tiempo se vayan lavando del suelo y subsuelo.

### Nitrato

A pesar de sus bajas concentraciones (2 mg  $NO_3^-/l$ ), dos tercios de las entradas consideradas en el balance de nitrato estuvieron asociadas al agua de lluvia (34%) y del riego (32%). El nitrato procedente de las áreas exteriores de secano (RI, AL, AB, RS) constituyó un 27% a las entradas del balance siendo muy inferior los aportes por EL (4%), AP (2%) y DP (1%).

Las salidas se produjeron básicamente a través de AT (96%) justificando el menor esfuerzo invertido en la estimación de AC (2%) y SB (2%). La  $[NO_3^-]$  media de las mues-

Tabla 2. Índice de Aprovechamiento de Agua (IAA), Conductividad Eléctrica del drenaje en época de no riego ( $CE_{NR}$ ), Masa anual de sales exportada en el drenaje ( $D_s$ ) e Índice de Contaminación por Sales (ICS) para el área regable incluida en la cuenca del Arba (Arba-Bardenas) y para los regadíos estudiados en Bardenas I (Lasanta *et al.*, 2002; Causapé *et al.*, 2004), Monegros I (Isidoro *et al.*, 2006a-b) y Monegros II (Tedeschi *et al.*, 2001; Caveró *et al.*, 2003)

Table 2. Water Use Index (IAA), Electrical Conductivity of the drainage during non-irrigation season ( $CE_{NR}$ ), yearly salt mass exported by the drainage ( $D_s$ ) and Salt Contamination Index (ICS) for the irrigated area belonging to the Arba basin (Arba-Bardenas) and for the irrigated lands studied in Bardenas I (Lasanta *et al.*, 2002; Causapé *et al.*, 2004), Monegros I (Isidoro *et al.*, 2006a-b) and Monegros II (Tedeschi *et al.*, 2001; Caveró *et al.*, 2003)

	IAA %	$CE_{NR}$ dS/m	$D_s$ t/ha-año	ICS t/ha-año/dS/m
Arba-Bardenas	83	3,00	5	1,7
Bardenas I	52	0,85	4	4,8
Monegros I	48	1,78	20	11,4
Monegros II	90	8,40	14	1,6

tras colectadas en AT fue de 40 mg/l (CV= 35%), si bien, una vez ponderada por volumen, la [NO<sub>3</sub><sup>-</sup>] media fue inferior (33 mg/l). Un 25% de las muestras colectadas presentó concentraciones superiores al límite sanitario de 50 mg/l existiendo concentraciones máximas de 94 mg/l (18/11/2004) y mínimas de 1 mg/l (10/09/2005).

Los flujos hídricos no asociados al regadío evaluado (RI, AL, AB, RS, EL, AP, y DP), que supusieron respectivamente el 29 y 18% del agua y sales en AT, AC y SB, tan sólo supusieron el 9% del nitrato saliente demostrando

que la mayor parte de nitrato exportado de la cuenca del Arba tuvo su origen en el regadío.

La diferencia entre las entradas y salidas (tabla 3) se justificó como el resultado de los componentes del balance no tenidos en cuenta (fertilización nitrogenada, volatilización, extracción en las cosechas...) y el nitrato acumulado en el sistema, bien en acuíferos o en el suelo.

En los cuatro años de estudio, las entradas menos las salidas fueron negativas, oscilando entre -29 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/ha del lluvioso año

Tabla 3. Entradas (R-Riego, P-Precipitación, RI-Riguel, AL-Arba de Luesia, AB-Arba de Biel, RS-Resto Secano, EL-agua destinada a generar electricidad y posteriormente vertida al Arba sin uso para riego, AP-Abastecimiento a pequeñas poblaciones, y DP-Depuradora de Ejea), Salidas (AT-Arba en Tauste, AC-Acequias laterales que puentean la estación del Arba en Tauste, SB-flujo subterráneo a través del aluvial del Arba), diferencia entre entradas y salidas (E-S) del balance de nitrato desarrollado en el área regable incluida en la cuenca del Arba para los cuatro años de estudio (2004-2007).

*Table 3. Inputs (R-Irrigation, P-Precipitation, RI-Riguel, AL-Arba de Luesia, AB-Arba de Biel, RS-Rainfed land, EL- Water used to generate electricity and then disposed into the Arba without being used for irrigation, AP-Water supply to small villages, DP- Sewage treatment plant of Ejea), Outputs (AT-Arba Tauste, AC-Lateral channel in Arba Tauste, SB-Groundwater flow through Arba aquifer), difference between inputs and outputs in the nitrate balance developed in the irrigated area in the Arba basin for the four study years (2004-2007).*

Año		2004	2005	2006	2007	04-07
t/ha·año						
E-ENTRADAS	R	2,4	2,2	2,8	2,3	2,4
	P	3,6	1,4	2,8	2,4	2,6
	RI	0,4	0,1	0,2	0,7	0,3
	AL	0,7	0,0	0,1	0,4	0,3
	AB	0,8	0,2	0,2	0,5	0,4
	RS	1,5	0,5	0,9	1,0	1,0
	EL	0,7	0,0	0,0	0,6	0,3
	AP	0,2	0,2	0,1	0,0	0,1
	DP	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1
S-SALI	AT	37,7	28,4	18,7	26,2	27,7
	AC	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	SB	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
ΣEntradas (kg N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /ha·año)		10	5	7	8	8
ΣSalidas (kg N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /ha·año)		39	29	20	27	29
E-S (kg N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /ha·año)		-29	-25	-12	-19	-21

2004, que presentó las mayores entradas y salidas (10 y 39 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/ha), y -12 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/ha de 2006, que presentó las menores salidas (20 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/ha) con posterioridad al año con menores entradas (2005: 5 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/ha).

Dado que al final de los cuatro años de estudio el balance hídrico cerró adecuadamente, los 29 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/ha·año salientes de la cuenca del Arba se justificaron con el nitrato aportado en el riego y la lluvia (5 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/ha·año), el nitrato entrante no asociado al regadío estudiado (3 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/ha·año) y 21 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/ha·año más (72% de las salidas) asociados a otros aportes de nitrato, principalmente, con la fertilización de los cultivos y otros componentes del balance de nitrógeno no considerados.

Las NF media de los cuatro años de estudio fue de 90 kg N/ha·año con pequeña variabilidad anual (CV= 5%). La menor superficie de maíz en 2004 propició un descenso de 6 y 4 kg N/ha·año en las NF de 2005 (85 kg N/ha·año) y 2006 (87 kg N/ha·año). La pequeña recuperación de la superficie cultivada de maíz unido al incremento del cereal de invierno, principalmente por alfalfa, condicionó la máxima NF de 2007 (95 kg N/ha).

Las variaciones anuales en las NF se manifestaron en el drenaje medido al final de la cuenca con varios meses de retraso, ya que el nitrógeno aportado con los fertilizantes se vio condicionado en su lixiviado del suelo a la disponibilidad en forma de nitrato. Además, el drenaje de la cuenca estuvo afectado por la regulación hídrica del sistema.

Aún así, las reducciones de NF en 2005 y 2006 se hicieron notar en su drenaje anual al presentar un 20 y 49% menos de nitrato exportado que en 2004, con concentraciones del drenaje un 32 y 43% inferiores (tabla 4). El ascenso de las necesidades de fertilización y el drenaje asociado al regadío evaluado en 2007 incrementó D<sub>N</sub> de 18 a 24 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/ha pero no así la concentración del drenaje que presentó el mínimo anual de 59 mg/l.

El ICN anual osciló entre 0,38 de 2004 y 0,21 de 2006, presentando una alta variabilidad (CV= 26%) que confirma la necesidad de realizar este tipo de estudios con carácter plurianual.

Analizando la evolución anualmente acumulada de D<sub>N</sub>, NF, e ICN (fig. 3) se observó que hasta finales de 2006 D<sub>N</sub> disminuyó 4 kg N-

Tabla 4. Necesidades de Fertilización (NF), Drenaje propio del sistema (D), masa (D<sub>N</sub>) y concentración de nitrato ([NO<sub>3</sub><sup>-</sup>]<sub>D</sub>) de éste e Índice de Contaminación por Nitratos (ICN) para el área regable de Bardenas incluida en la cuenca del Arba en los cuatro años del estudio (2004-2007).

Table 4. Fertilization needs (NF), Drainage associated to the drainage (D), exported nitrate mass (D<sub>N</sub>) and nitrate concentration ([NO<sub>3</sub><sup>-</sup>]<sub>D</sub>) of the system, and Nitrate Contamination Index (ICN) for the irrigated area belonging to the Arba basin for the four study years (2004-2007).

Año	2004	2005	2006	2007	04-07
NF (kg N/ha·año)	91	85	87	95	90
D (mm·año)	135	160	122	180	149
D <sub>N</sub> (kg N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /ha·año)	35	28	18	24	26
[NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] <sub>D</sub> (mg/l)	114	78	65	59	78
ICN	0,38	0,33	0,21	0,25	0,29

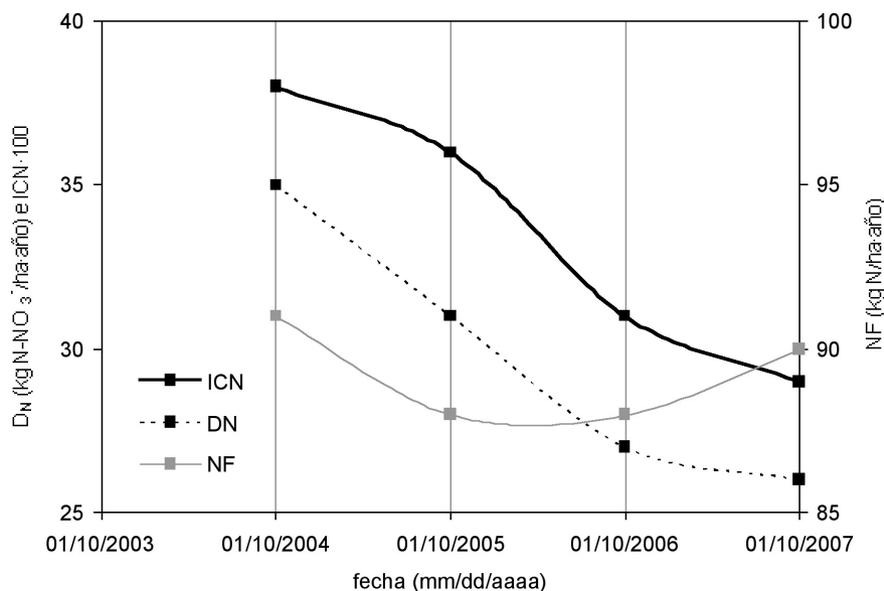


Figura 3. Masa de nitrato exportada en el drenaje propio del sistema ( $D_N$ ), Necesidades de Fertilización (NF) e Índice de Contaminación por Nitratos (ICN) anualmente acumulados para los cuatro años de estudio (2004-2007) en el área regable incluida dentro de la cuenca del Arba.  
 Figure 3. Nitrate mass exported by the drainage associated to the system ( $D_N$ ), yearly cumulative Fertilization Needs (NF) and Nitrate Contamination Index (ICN), for the four study years (2004-2007) in the irrigated area belonging to the Arba basin.

$\text{NO}_3^-/\text{ha}\cdot\text{año}$  reduciéndose 1  $\text{kg N-NO}_3^-/\text{ha}$  más hasta finales de 2007 cuando se obtuvo la media de 26  $\text{kg N-NO}_3^-/\text{ha}\cdot\text{año}$  en los cuatro años de estudio. La menor disminución de  $D_N$  en 2007 estuvo condicionada por el incremento en este último año de las NF y D (tabla 4).

Con todo ello, el ICN presentó durante los años de estudio una clara tendencia descendente desde 0,38 en 2004 a 0,29 al final del periodo de estudio. Ello indicó una mejora continuada en el aprovechamiento del nitrógeno aplicado a los cultivos con la fertilización traducida en el descenso de la concentración y masa de nitrato exportado en el drenaje.

Comparando los resultados obtenidos en este estudio (tabla 5) frente a los obtenidos en

otras pequeñas cuencas de regadíos del Ebro se pudo observar que el  $D_N$  de los regadíos incluidos en la cuenca del Arba (26  $\text{kg N-NO}_3^-/\text{ha}\cdot\text{año}$ ) fue la cuarta parte de lo que exportaron pequeñas subcuencas de su mismo sistema de Bardenas (108  $\text{kg N-NO}_3^-/\text{ha}\cdot\text{año}$ ) y de otros sistemas como Monegros I (111  $\text{kg N-NO}_3^-/\text{ha}\cdot\text{año}$ ) también regados por inundación sobre suelos inadecuados para ello.

Este hecho estuvo condicionado a que NF fue un 40% inferior pero también a que el índice de aprovechamiento del agua fue en torno a un 30% superior. Así pues, la intensa reutilización del agua de drenaje que se hizo en Bardenas actuó doblemente, ya que los cultivos reaprovecharon tanto parte del agua como del nitrato contenido en el drenaje.

Tabla 5. Índice de Aprovechamiento de Agua (IAA), Necesidades de Fertilización (NF), Masa anual de nitrato exportado en el drenaje ( $D_N$ ) e Índice de Contaminación por Nitrato (ICN) para el área regable incluida en la cuenca del Arba (Arba-Bardenas) y para los regadíos estudiados en Bardenas I (Causapé et al., 2004b-c), Monegros I (Isidoro et al., 2006a-b) y Monegros II (Cavero et al., 2003)

*Table 5. Water Use Index (IAA), Fertilization needs (NF), yearly salt mass exported by the drainage ( $D_N$ ) and nitrate Contamination Index (ICN) for the irrigated area belonging to the Arba basin (Arba-Bardenas) and for the irrigated lands studied in Bardenas I (Causapé et al., 2004), Monegros I (Isidoro et al., 2006a-b) and Monegros II (Cavero et al., 2003)*

	IAA %	NF Kg N/ha·año	$D_N$ Kg N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /ha·año	ICN
Arba-Bardenas	83	90	26	0,29
Bardenas I	52	146	108	0,74
Monegros I	48	155	111	0,71
Monegros II	90	145	31	0,22

Las menores NF de los regadíos de Bardenas incluidos en la cuenca del Arba (90 kg N/ha·año) frente a las NF de los modernos regadíos por aspersión de Monegros II (145 kg N/ha·año) también condicionaron que la masa de nitrato exportada fuese un 16% inferior, si bien, el ICN fue un 24% superior.

Ello indica que el aprovechamiento del nitrógeno aportado para la fertilización de los cultivos en Bardenas debería ser mejorado en parcela mediante un adecuado manejo combinado del riego y fertilización nitrogenada, algo que no es fácil de conseguir en Bardenas por la presencia mayoritaria de suelos muy permeables de baja capacidad de retención de agua y sistemas de riego por inundación que no permiten un control suficiente de las fechas-dosis de agua y nitrógeno a aplicar.

No obstante, cambios en la gestión del riego por inundación, de turnos a la demanda, o la facturación por consumo de agua en vez de por superficie regada son medidas baratas que han reducido a la mitad el agua, sales y nitrato exportados en una pequeña cuenca de la CR<sub>V</sub> de Bardenas (Causapé y Clavería, 2007).

La tendencia positiva de los últimos años también indica que sin importantes cambios del regadío sigue habiendo margen de mejora en la aplicación de fertilizantes nitrogenados, algo que no sólo es conveniente para el medioambiente, sino también para el sector agrario por el alto coste que están alcanzando los agroquímicos en los últimos años.

### Conclusiones

A pesar de su baja mineralización (275 mg/l), el 60% de las sales introducidas en el sistema evaluado lo hicieron a través del agua de riego. En cuanto a las salidas, el 98% se produjeron a través de AT. Del total de sales exportadas (AT+AC+SB), el 85% (5,09 t/ha·año) fueron asociadas al drenaje propio del sistema evaluado. De éstas, un 69% procedió de la disolución de materiales geológicos (3,52 t/ha·año), otro 29% tuvo su origen en las sales introducidas con el agua de riego (1,49 t/ha·año) y tan solo el 2% se correspondieron a las sales contenidas en el agua de lluvia (0,08 t/ha·año).

Los flujos hídricos no asociados al regadío evaluado (RI, AL, AB, RS, EL, AP, y DP), que supusieron respectivamente el 29 y 18% del agua y sales en AT, AC y SB, tan solo supusieron el 9% del nitrato saliente demostrando que la mayor parte de nitrato exportado tuvo su origen en el regadío.

La masa de sales exportada fue máxima en el lluvioso año 2004 (6,00 t/ha), para descender en 2005 (5,42 t/ha) y 2006 (4,35 t/ha) a causa de la sequía e incrementarse ligeramente en 2007 (4,60 t/ha). Las reducciones de NF en 2005 (85 kg N/ha) y 2006 (87 kg N/ha) también contribuyeron a una disminución del 20% (28 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/ha) y 49% (18 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/ha) del nitrato exportado en 2004 (NF: 91 kg N/ha, DN: 35 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/ha) mientras que el ascenso de NF en 2007 (95 kg N/ha) contribuyó al incremento de su D<sub>N</sub> a 24 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/ha.

La reducción de ICS (15%) e ICN (23%) indica que entre 2004 y 2007 ha existido una disminución del impacto agroambiental inducido por los regadíos de Bardenas. La intensa reutilización del agua de drenaje que se practicó (Causapé *et al.*, 2009), provocó que estos índices fuesen 60% inferiores a los obtenidos en pequeñas cuencas del mismo regadío. No obstante, el ICN todavía es un 24% superior al obtenido en modernos regadíos, indicando la necesidad de adecuar el manejo combinado del riego y fertilización en parcela, algo difícil de conseguir en Bardenas por su mayoritario riego por inundación en relación a la alta permeabilidad de los suelos.

#### Listado de abreviaturas

**AB:** Sales/nitratos introducidos a través del Arba de Biel

**AC:** Sales/nitratos exportados a través de dos acequias que puentean la estación de aforos del AT.

**AL:** Sales/nitratos introducidos a través del Arba de Luesia

**AP:** Sales/nitratos introducidos con el abastecimiento pequeñas poblaciones

**AT:** Sales/nitratos exportados a través del Arba en Tauste

**CE:** Conductividad eléctrica a 25°

**CE<sub>NR</sub>:** Conductividad eléctrica a 25° media del drenaje en periodo de no riego

**CV:** Coeficiente de variación

**D<sub>S-N</sub>:** Sales/nitratos exportadas a través del drenaje asociado al regadío estudiado

**DP:** Sales/nitratos introducidos por la depuradora de Ejea

**E:** Entradas a los balances de masas

**EL:** Sales/nitratos introducidos con el agua destinada a generar electricidad sin uso para riego

**EMEP:** European Monitoring and Evaluation Program

**EMR:** Evaluador Medioambiental de Regadíos

**EPA:** Environmental Protection Agency

**EU:** European Union

**FAO:** Food and Agriculture Organization of the United Nations

**[HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>]:** Concentración de bicarbonato

**IAA:** Índice de Aprovechamiento de Agua

**ICN:** Índice de Contaminación por Nitratos

**ICS:** Índice de Contaminación Salina

**NF:** Necesidades de Fertilización

**[NO<sub>3</sub><sup>-</sup>]:** Concentración de nitrato

**P:** Sales/nitratos introducidos con la precipitación

**OMS:** Organización Mundial de la Salud

**R:** Sales/nitratos introducidos con el riego

**RI:** Sales/nitratos introducidos a través del Riguel

**RS:** Sales/nitratos procedentes del resto de secano (superficie no regable)

**S:** Salidas de los balances de masas

**SB:** Sales/nitratos exportados subterráneamente a través del aluvial del Arba en Tauste

**SDT:** Sólidos disueltos totales

## Agradecimientos

Agradecer a Confederación Hidrográfica del Ebro la financiación del estudio.

## Referencias

- Abrahão R, Clavería I, Causapé J, García I, 2008. La transformación en riego del sector XII de Bardenas II (Zaragoza). Impacto ambiental en su segundo año bajo riego. Actas del XXVI Congreso Nacional de Riegos de Huesca. 59-60.
- Betrán J, 2006. Revisión de la fertilización nitrogenada. Fertilización nitrogenada. Guía de actualización. Informaciones Técnicas. Centro de Investigación y Tecnología agroalimentaria. Ed. Gobierno de Aragón. 196 pp.
- Bower C, Wilcox L, 1965. Soluble salt. In: Methods of soil analysis. Chemical and Microbiological Agronomy nº 9. American society of agronomy. Part 2. 933-951 pp.
- Causapé J, Quílez D, Aragüés R, 2004. Assessment of irrigation and environmental quality at the hydrological basin level. II: salt and nitrate loads in irrigation return flows. Agricultural Water Management. 70: 211-218.
- Causapé J, Quílez D, Aragüés R, 2006. Irrigation efficiency and quality of irrigation return flows in the Ebro River Basin: An overview. Environmental Monitoring and Assessment. 117: 451-461.
- Causapé J, Clavería I, 2007. Drought as an agri-environmental determinant of irrigation land. The case of Bardenas (Spain). Environmental Geology. 51(7): 1213-1220.
- Causapé J, 2008. EMR 1.0: Herramienta al servicio de la vigilancia agroambiental del regadío. Información Técnica Económica Agraria. 104(3): 369-380.
- Causapé J, García-Garizábal I, Abrahão R, 2009. Aprovechamiento del agua en los regadíos de Bardenas. Información Técnica Económica Agraria. poner volumen y páginas cuando estén asignadas.
- Cavero J, Beltrán A, Aragüés R, 2003. Nitrate exported in the drainage water of two sprinkler irrigated watershed. J. Environmental Quality 32: 916-926.
- Custodio E, Llamas M.1983. Hidrología Subterránea. Ediciones Omega. 2.290 pp.
- EMEP, 2008. European Monitoring and Evaluation Program. Análisis de agua de lluvia disponibles en: <http://www.nilu.no/projects/cc/>
- European Union, 1998. Council Directive 98/83/CE of 3 November 1998 imposed to the surface waters devoted to the production of water for human consumption. Official Journal L 330, 5/12/1998. 32-54.
- FAO, 2002. Agua y cultivos. Logrando el uso óptimo del agua en la agricultura. Depósito de documentos de la FAO. 22 pp.
- Isidoro D, Quílez D, Aragüés R, 2006a. Environmental Impact of Irrigation in La Violada District (Spain): I. Salt Export Patterns. Journal Environmental Quality 35: 766-775.
- Isidoro D, Quílez D, Aragüés R, 2006b. Environmental Impact of Irrigation in La Violada District (Spain): II. Nitrogen Fertilization and Nitrate Export Patterns in Drainage Water. Journal Environmental Quality 35: 776-785.
- Jiménez R, Lamo de Espinosa J, 1998. Agricultura sostenible. Mundiprensa Madrid. 616 pp.
- Lasanta T, Mosch W, Pérez-Rontomé MC, Navas A, Machín J, Maestro M, 2002. Effects of irriga-

- tion on water salinization in semi-arid environments. a case study in Las Bardenas, Central Ebro Depression, Spain. Environmental change and water sustainability. García-Ruíz J.M., Jones A., Arnáez J. Eds. Instituto Pirenaico de Ecología. 198-218.
- OMS, 2004. Guías para la calidad del agua potable. Volumen 1. Recomendaciones. Organización Mundial de la Salud. Ginebra, 2004.
- Orús F, Sin E, 2006. El balance del nitrógeno en la agricultura. Capítulo 1 en Fertilización Nitrogenada. Guía de actualización. Informaciones Técnicas. Centro de Transferencia Agroalimentaria. Ed. Gobierno de Aragón. 196 pp.
- Scavia D, Bricker S, 2006. Coastal eutrophication assessment in the United States. Biogeochemistry 79(1-2): 187-208.
- Tedeschi A, Beltrán A, Aragüés R, 2001. Irrigation management and Hydrosalinity balance in a semi-arid area of the middle Ebro River Basin (Spain). Agricultural Water Management. 49: 31-50.
- Wang B, 2006. Cultural eutrophication in the Changjiang (Yangtze River) plume: History and perspective. Estuarine Coastal and Shelf Science. 69(3-4): 471-477.
- (Aceptado para publicación el 9 de junio de 2009)