

Calidad de las aguas de drenaje de la Comunidad de Regantes V del Canal de las Bardenas (Zaragoza)

D. Isidoro, J. Causapé, D. Quílez *, R. Aragüés

Unidad de Suelos y Riegos, Servicio de Investigación Agroalimentaria,
Diputación General de Aragón. Apdo. 727, 50080-Zaragoza.

dquilez@aragob.es

RESUMEN

Los flujos de retorno de la agricultura de regadío son una fuente potencial de contaminación de las aguas y suelos cuyo impacto real es preciso cuantificar. En este trabajo se analizó la salinidad (CE) y concentración de nitrato [NO_3^-] de los flujos de retorno de las 15.498 hectáreas pertenecientes a la Comunidad V del canal de las Bardenas (Zaragoza). Durante el año hidrológico 1999-2000 se muestrearon en 14 fechas un total de 49 puntos de la red de drenaje de dicha comunidad, 39 sobre desagües y 10 sobre ríos. Las aguas de los desagües se caracterizaron por un valor medio de CE bajo (0,84 dS/m) y de concentración de nitrato alto (54 mg/L), mientras que las de los ríos presentaron una CE media algo más elevada (0,97 dS/m) y una concentración de nitrato mucho más baja (27 mg/L). La CE y la concentración de nitrato fueron mayores en invierno que durante la estación de riego, lo que indica una dilución del agua de los desagües por los sobrantes de riego. Sin embargo, las masas de sales y nitrato exportadas a través del río Riguel fueron más elevadas durante la estación de riego debido a los mayores caudales de agua circulantes. El análisis factorial sobre las concentraciones de los iones principales medidos en las aguas de drenaje durante la estación de no riego reveló la existencia de tres factores independientes ligados a la salinidad global (Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- y SO_4^{2-}), a la concentración de Ca^{2+} y a la concentración de NO_3^- . La utilización de técnicas de clasificación automática sobre las concentraciones iónicas discriminó de forma consistente entre los desagües que proceden de las terrazas altas (sasos), con valores bajos de CE (media 0,74 dS/m) y RAS (relación de adsorción de sodio) (media 0,84 (mmol/L)^{0.5}), y los que drenan las terrazas aluviales, que presentaron valores más elevados de CE y RAS (CE media 1,17 dS/m; RAS media 2,37 (mmol/L)^{0.5}). Los flujos de retorno del riego de la comunidad V del canal de las Bardenas se caracterizaron por unos valores bajos de salinidad y sodicidad, una acusada dilución estival debida a los sobrantes del riego y unas elevadas concentraciones de nitrato, razón por la cual los futuros trabajos en esta comunidad deben concentrarse fundamentalmente en la mejora conjunta del riego y de la fertilización nitrogenada.

Palabras clave: retornos de riego, calidad del agua, salinidad, nitrato, variabilidad espacio-temporal.

* Autor para correspondencia
Recibido: 25-9-01
Aceptado para su publicación: 5-6-02

INTRODUCCIÓN

La puesta en riego de nuevas tierras proporciona estabilidad a las producciones agrícolas y a los sectores que dependen de la agricultura y supone un incremento de su potencial productivo. En particular, en España, el regadío supone el 15 % de la superficie cultivada y es responsable del 60 % de la producción total agraria (Feres y Ceña, 1997). Sin embargo, la intensificación de los insumos de producción (en particular el agua y los agroquímicos), inherente a la agricultura de regadío, puede provocar efectos negativos sobre los recursos agua y suelo, hasta el punto de que un manejo inadecuado de dichos insumos puede hacer insostenible el mantenimiento del regadío. Entre estos efectos están la degradación de los suelos (salinización y sodificación) y de las aguas superficiales y subterráneas (salinización y contaminación por nutrientes, plaguicidas y sus metabolitos).

La agricultura de regadío presenta un riesgo de fertilización excesiva ya que el agua no es un factor limitante. Así en la Comunidad Autónoma de Aragón con 445.000 ha en regadío (Orús *et al.*, 2000) las extracciones de nitrógeno por los cultivos se han estimado (año 1999) en 91.802 t, mientras que el consumo de fertilizantes minerales fue de 94.120 t durante el año 1997, contando además con una disponibilidad potencial de N procedente de estiércoles animales de 82.468 t (Orús *et al.*, 2000). Esto indica que las cantidades de N aplicados en la fertilización casi duplican a las extracciones de los cultivos en esta Comunidad Autónoma. Estos excesos son también altos en otros países europeos, como Alemania con un exceso de N de 167 kg/ha (Kücke y Kleeberg, 1997). Kanwar y Webb (1997) estimaron que en USA la optimización del uso de los fertilizantes podría ahorrar millones de dólares en fertilizantes y al mismo tiempo mantener la calidad de los recursos hídricos a unos niveles aceptables.

La zona regable de Bardenas, localizada en Aragón y Navarra, se transformó en riego en 1959 y actualmente comprende 65.586 ha (Confederación Hidrográfica del Ebro, 2001a). Por su importancia dentro de los regadíos de la Cuenca del Ebro y por la presencia en la Cuenca del Arba de materiales salinos, la zona regable de Bardenas I ya ha sido objeto de estudios en relación con los problemas de degradación del suelo y su control a través del drenaje (Martínez-Beltrán, 1978) y de la salinización de las aguas superficiales inducida por el riego (Basso, 1994).

Para este estudio se seleccionó la Comunidad de Regantes V de Bardenas, por ser la más extensa de la zona regable con 15.498 ha en riego. Los objetivos de este trabajo fueron: (1) establecer los niveles medios de salinidad y nitrato en las aguas de la red de drenaje de la Comunidad de Regantes V de Bardenas durante el año hidrológico 1999-2000 (2) analizar su variabilidad espacial y temporal así como sus posibles relaciones con las características de los suelos y con el manejo del agua y de la fertilización nitrogenada, y (3) identificar las áreas-fuente contaminantes más relevantes, susceptibles de realización de estudios posteriores más detallados.

MATERIAL Y MÉTODOS

Descripción de la zona de estudio

La Comunidad de Regantes V de Bardenas, está localizada en los términos municipales de Biota, Ejea de los Caballeros y, en menor medida, Sádaba (provincia de Za-

ragoza), dentro de la cuenca del río Arba. El río Riguel, divide longitudinalmente a esta Comunidad y actúa como colector de la mayor parte de sus retornos de riego. Existen además otros cursos fluviales importantes que recogen aguas de retorno como el río Arba y el Barranco de Valareña que desemboca en el tramo inferior del río Riguel (Fig. 1).

El suministro de agua se efectúa a través del Canal de las Bardenas, con origen en el embalse de Yesa (de 470 hm³ de capacidad) localizado en la cabecera del río Aragón, y presenta una baja salinidad y concentración de nitrato ($CE = 0,32$ dS/m, $[NO_3] < 2$ mg/L; valores medios del Aragón en Yesa entre 1972 y 1997; Confederación Hidrográfica del Ebro, 2001b).

La Comunidad n.º V se sitúa sobre extensos sistemas glacis-terracea entre los cuales inciden valles aluviales generados por la red fluvial actual. En las laderas de estos valles afloran materiales lutíticos terciarios que constituyen el nivel impermeable de los acuíferos asociados a los cuaternarios. Dentro de los cuaternarios se pueden diferenciar esencialmente los glacis y los aluviales, que se asientan sobre los materiales terciarios ("buro" en terminología local) que constituyen los principales niveles acuíferos. Litológicamente los glacis están formados por cantos homométricos (calizas mesozoicas y eocenas, y cuarcitas) angulosos y subredondeados englobados en matriz arcillosa, con tramos ocasionales de arcillas y limos intercalados en las gravas ("saso" en terminología local). Estas gravas pueden estar cementadas formando pequeños bancos de conglomerados ("mallacán" en terminología local).

La comunidad V de Bardenas se sitúa sobre los glacis de Miraflores (50 km²) y Miralbueno (120 km²), separados ambos por el aluvial del Riguel. Siguiendo a Martínez-Beltrán (1978) y Basso (1994) y a partir de los estudios desarrollados por la Unidad de Suelos y Riegos del Servicio de Investigación Agroalimentaria de la D.G.A. (sin publicar) se pueden distinguir en la Comunidad V tres tipos de suelos: (1) los suelos de terrazas altas, conocidos como *sasos*, de textura franco-arenosa, con una fracción variable de elementos gruesos que puede llegar a ser muy alta (hasta el 67 % en volumen), poca profundidad y un gran contenido calizo, que en ocasiones da lugar a un horizonte petrocálcico a poca profundidad (en torno a 40 cm) conocido localmente como *mallacán*, que suelen estar bien drenados al descansar sobre un horizonte de gravas y representan en torno al 70 % de la superficie de la comunidad; (2) los suelos de las llanuras aluviales, más profundos (más de 100 cm casi siempre) y de texturas más arcillosas, que presentan ocasionalmente problemas de drenaje y salinidad y (3) los suelos de ladera, de pendientes fuertes, que se encuentran abancalados para su puesta en riego (Fig. 1).

Los principales cultivos en la Comunidad V durante la campaña de 2000 fueron la alfalfa (5.065 ha) y el maíz (4.705 ha), seguidos del cereal de invierno (2.130 ha), girasol (1.225 ha), pastos (838 ha) y arroz (614 ha). La superficie cultivada de hortalizas fue de 750 ha, siendo las principales el pimiento, el puerro y el tomate.

El riego por inundación es el principal sistema implantado en la comunidad V, con un turno medio de riego de unos 13 días. Este sistema de riego, unido a las características de los suelos, produce unas eficiencias medias de riego en parcela del 53 % en los suelos de saso (70 % de la superficie) y del 80 % en los suelos de aluvial (Lecina *et al.*, 2001). El mayor número de riegos durante el año 2000 se aplicó a la alfalfa y hortalizas (10 riegos), mientras que el menor número de riegos se aplicó al cereal y girasol (3 y 5 riegos, respectivamente). El número de riegos para el maíz fue de 7 u 8, distribuidos de junio a septiembre.

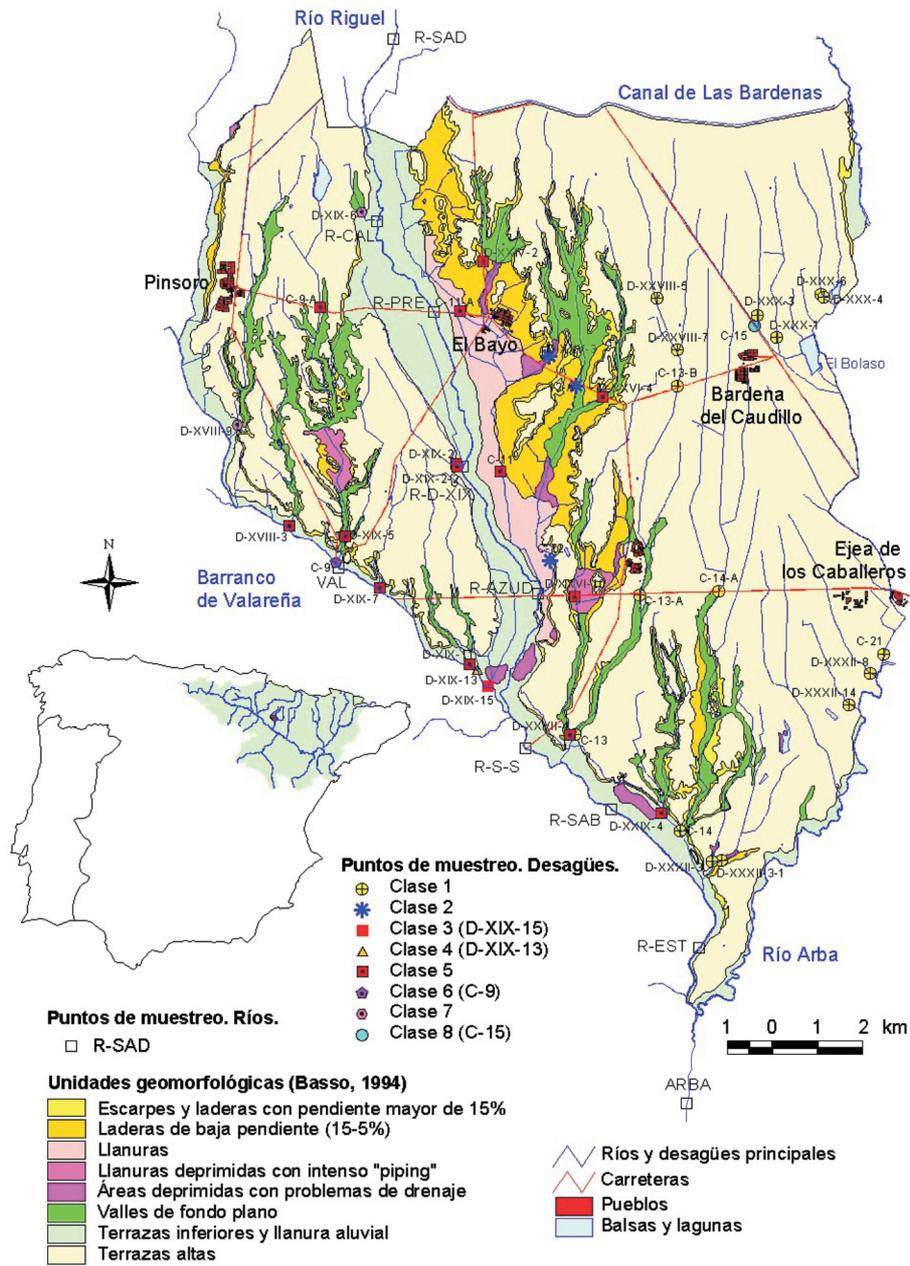


Fig. 1.—Puntos de muestreo en la red de desagües y en los ríos y mapa geomorfológico de la Comunidad V de Bardenas. Los puntos de muestreo en la red de desagües se han agrupado en ocho clases mediante técnicas de clasificación automática.

El análisis de las encuestas de fertilización realizadas en la campaña del año 2000 mostró que las dosis más altas de nitrógeno se aplicaron al maíz (media de 425 kg/ha). Habitualmente, el N se reparte en un abonado de presembrado en abril (media de 125 kg/ha, utilizando abonos compuestos del tipo 15-15-15 ó 19-19-19) y en uno de cobertera en junio (media de 300 Kg/ha con urea del 46 %). La producción media de maíz según las encuestas fue de 10.200 kg/ha, lo que significa que, como media, se aplicaron 42 kg N/t de producción, valor muy superior a los 28-30 kg N/t recomendados por Betrán y Pérez-Berger (1994).

Toma de muestras y análisis

Durante el año hidrológico 1999-2000 se muestrearon un total de 49 puntos en la red de drenaje de la Comunidad V de Bardenas: 39 puntos localizados en desagües o colectores y 10 puntos en los ríos (Fig. 1). Los puntos de muestreo de los desagües se localizaron preferentemente en sus tramos medios e inferiores. En total se muestrearon 26 puntos sobre 25 desagües secundarios (los puntos D-XXVI-10 y D-XXVII-4 son denominaciones distintas de un mismo desagüe en diferentes sectores de riego) y 13 puntos sobre 7 colectores principales. Los colectores principales (que normalmente delimitan los sectores de riegos) se nombraron con una C y los desagües secundarios (localizados dentro de los sectores de riego) con una D. Cuando a lo largo de un colector se seleccionaron varios puntos de muestreo, éstos se nombraron añadiendo una letra por orden alfabético al nombre del colector en los puntos sucesivos aguas arriba del de la desembocadura, al que no se añadió letra alguna. Los puntos de muestreo se tomaron de modo que se distribuyeran sobre toda la superficie de la comunidad, se tomaran muestras de todos los desagües importantes en su tramo final y fueran de fácil acceso.

En el caso de los ríos se seleccionaron ocho puntos de muestreo a lo largo del cauce del río Riguel, que recoge la mayoría de las aguas de drenaje de la zona. El punto de muestreo más cercano a la cabecera del río se situó en Sádaba, punto de inicio de la zona regable y sin influencia de sus retornos. El resto de los puntos se seleccionó intentando buscar un espaciado regular entre ellos y una buena accesibilidad (Fig. 1). Además, se localizó un punto de muestreo en el barranco de Valareña y otro en el río Arba, 1 kilómetro aguas abajo de la confluencia con el Riguel y fuera de los límites de la comunidad n.º V.

En cada uno de estos 49 puntos de muestreo se tomaron catorce muestras de agua durante el año hidrológico octubre 1999-septiembre 2000, siendo la periodicidad del muestreo mensual e intensificando el muestreo (periodicidad quincenal) durante junio y julio, meses en los que se realiza la fertilización nitrogenada de cobertera en el maíz. En las muestras de agua se determinó la conductividad eléctrica a 25 °C (CE) con un conductímetro ORION 1230, y la concentración de nitrato ($[NO_3^-]$) mediante un cromatógrafo iónico DIONEX 2000-isp.

En las muestras de la estación de no-riego (entre octubre de 1999 y marzo de 2000) se determinó, además, la concentración de cloruro y sulfato por cromatografía iónica, y la de calcio, magnesio y sodio por espectrofotometría de absorción atómica.

La masa de sales y nitrato exportadas a través del río Riguel se calculó para el punto R-EST (Fig. 1, último punto de muestreo en el Riguel, un kilómetro aguas arriba de su desembocadura en el Arba). El caudal del Riguel en este punto se estimó a partir del caudal del Arba en Tauste, medido por la Confederación Hidrográfica del Ebro en el período de

estudio, y de las ecuaciones de regresión para las estaciones de riego (abril-septiembre) y no riego (octubre-marzo) obtenidas entre los caudales medidos en el Arba en Tauste y en el Riguel en R-EST entre los días 7 abril 92 y 7 octubre 94 (período en que estuvo en funcionamiento una estación de aforos en R-EST). Estas ecuaciones de regresión, ambas significativas ($p < 0,05$), son:

$$Q_{R-Est} = 1,38 + 0,34 \cdot Q_{Tauste}, r^2 = 0,67 \text{ (estación de no riego)}$$

$$Q_{R-Est} = 3,30 + 0,31 \cdot Q_{Tauste}, r^2 = 0,59 \text{ (estación de riego)},$$

donde Q es el caudal (m^3/s) de la estación respectiva.

La CE se convirtió a sólidos disueltos totales (TDS) utilizando la ecuación

$$TDS \text{ (mg/L)} = 89 + 682 \cdot CE \text{ (dS/m a } 25 \text{ }^\circ\text{C)}, r^2 = 0,98,$$

obtenida para el total de muestras tomadas en el río Riguel. La masa total de sales y nitrato para cada uno de los días de muestreo se calculó como el producto del TDS o la concentración de nitrato por el caudal medio diario de dicho día.

Clasificación de los desagües

Los 39 puntos de muestreo en los desagües se clasificaron teniendo en cuenta su composición iónica durante la estación de no-riego. La utilización de muestras tomadas fuera de la estación de riego reduce el efecto de los sobrantes del riego sobre el comportamiento de los desagües, y los clasifica teniendo más en cuenta las diferencias en la salinidad de los suelos presentes en sus cuencas de recepción que las posibles diferencias en el manejo del riego. Para la clasificación se han utilizado los análisis completos de las cinco muestras del invierno de 1999-2000 (del 16 de noviembre de 1999 al 10 de marzo de 2000). En la clasificación no se tuvo en cuenta la concentración del ión bicarbonato, debido a que sólo se analizó en dos muestreos. Además, la ligadura existente entre la suma de cationes y aniones reduce el número de variables independientes en uno. Es destacable que la concentración de nitrato (con un valor medio de $1,15 \text{ mmol}_e/L$) fue equiparable a la del resto de los aniones analizados ($[Cl^-] = 2,26 \text{ mmol}_e/L$ y $[NO_3^-] = 1,52 \text{ mmol}_e/L$).

Para la clasificación de los desagües se tomaron como variables las dos primeras componentes principales estandarizadas (que explicaron el 89 % de la varianza), seleccionando como distancia entre las observaciones la distancia euclídea y como criterio de agregación el de la mínima distancia media entre las clases (Júdez, 1989). Se ha optado por presentar una clasificación en ocho clases, que dan una idea bastante precisa de las diferencias en la composición química del agua entre los desagües de la comunidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El valor medio, desviación estándar, coeficiente de variación, máximo y mínimo de la CE y la concentración de NO_3^- medidos en los 39 puntos de muestreo de los desagües y en los 9 de los ríos Riguel y Arba para el año hidrológico, la estación de riego y la estación

de no riego se presentan en la Tabla 1. La *CE* media del conjunto de desagües de la Comunidad V controlados durante el año hidrológico 1999-2000 fue de 0,84 dS/m. Esta baja *CE* indicó que la presencia de sales en el suelo o subsuelo es escasa y/o que una parte importante de las aguas de drenaje son sobrantes directos del riego (aguas de cola de acequias o escorrentías de riego en parcelas), que actúan como aguas de dilución. La correspondiente concentración media de NO_3^- fue de 54 mg/L, valor elevado que supera el nivel máximo admisible para consumo humano (50 mg/L, Real Decreto 1138/1990). El valor medio de la concentración de nitrato en los desagües durante la estación de riego (42 mg/L) es similar al encontrado por Isidoro (1999) en el polígono de riego de La Violada (37 mg/L) donde el riego también se realiza por inundación y el maíz es el cultivo más importante. Jaynes *et al.* (1999) en aguas de drenaje de Walnut Creek (central Iowa, USA), donde se da principalmente una rotación maíz-soja, encontraron una concentración de nitrato media en el período 1992-1995 de entre 38 mg/L y 49 mg/L. Schilling y Libra (2000) encontraron valores medios anuales de entre 13 mg/L y 46 mg/L en aguas de drenaje de 10 cuencas de Iowa (USA) aumentando la concentración al aumentar la superficie agrícola. Bouaraoui *et al.* (1999) en la cuenca de Naizin (Bretaña, Francia) encontraron valores medios anuales algo más altos, de entre 41 mg/L y cerca de 70 mg/L, debido al

Tabla 1

Media, desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV), máximo y mínimo de los valores medios de *CE* y concentración de NO_3^- para el año hidrológico (14 muestras), la estación de riego (8 muestras) y la estación de no riego (6 muestras) en los 39 puntos de muestreo de los desagües y los 9 puntos de muestreo de los ríos Riguel y Arba

	<i>CE</i> (dS/m)			Concentración de NO_3^- (mg/L)		
	Año hidrol.	Riego	No riego	Año hidrol.	Riego	No riego
DESAGÜES						
Media	0,84	0,77	0,94	54	42	68
DE	0,32	0,24	0,38	33	24	37
CV	38 %	32 %	40 %	62 %	58 %	54 %
Máximo	2,71 (D-XIX-15)	2,0 (D-XIX-15)	2,71 (D-XIX-15)	300 (D-XVIII-9)	134 (D-XIX-6)	300 (D-XVIII-9)
Mínimo	0,27 (C-15)	0,29 (C-15)	0,27 (C-15)	0 (C-15)	1 (C-15)	1 (C-15)
RÍOS						
Media	0,97	0,88	1,09	26	21	33
DE	0,33	0,26	0,38	17	13	19
CV	34 %	29 %	35 %	66 %	63 %	58 %
Máximo	1,75 R-S-S	1,43 ARBA	1,75 R-S-S	78 R-XIX	70 R-XIX	78 R-XIX
Mínimo	0,33 R-SAD	0,33 R-SAD	0,48 R-SAD	0 R-SAD	2 R-SAD	0 R-SAD

Entre paréntesis se indica el punto de muestreo que presenta los valores medios máximo o mínimo.

exceso estructural de nitrógeno en la misma. Así los valores medio de $[NO_3^-]$ encontrados son similares a los de otras cuencas agrícolas intensivas.

Los valores puntuales más altos de *CE* se encontraron en el desagüe D-XIX-15 (2,71 dS/m) y las concentraciones más altas de NO_3^- en el D-XVIII-9 (300 mg/L), mientras que los valores más bajos de ambas variables se detectaron en el desagüe C-15 que recibe aportes de agua del Canal de las Bardenas. Se apreció que había mayores diferencias entre los desagües en los valores de la concentración de NO_3^- que en los valores de *CE* (coeficientes de variación más bajos), lo que indica que pueden existir factores adicionales, tales como la fertilización nitrogenada, que afecten a la concentración de nitrato.

Esta diferencia entre el comportamiento de la *CE* y la de la concentración de NO_3^- se reflejó claramente en los puntos de muestreo de los ríos Riguel y Arba (Tabla 1). La *CE* media de los ríos durante el año hidrológico 1999-2000 fue relativamente baja (0,97 dS/m) y con una variabilidad moderada ($CV = 34\%$), mientras que la concentración media de NO_3^- (26 mg/L) presentó una elevada variabilidad ($CV = 65\%$) que duplicó a la de la *CE*. Esta mayor variabilidad de la concentración de NO_3^- se debe, además de a una mayor variabilidad de la concentración de NO_3^- entre desagües, a la mayor diferencia en la concentración de nitrato que en la de sales entre el agua que entra en la zona y la media de los desagües. Así, las aguas que entran a la zona regable (Sádaba) tienen una concentración de nitrato muy baja (4 mg/L de media) frente a las aguas de drenaje, que tienen una concentración media más elevada (54 mg/L). Sin embargo, la *CE* media de las aguas del río Riguel en Sádaba (0,55 dS/m) se acerca más a la media de las aguas de drenaje (0,84 dS/m).

En los ríos, los valores máximos puntuales de salinidad (1,75 dS/m) se presentaron en el punto R-S-S (puente sobre el río Riguel en la carretera local que une Santa Anastasia con El Sabinar) los días 16 de noviembre de 1999 y 13 de enero de 2000, y el valor mínimo (0,33 dS/m) se registró el 9 de agosto de 2000 en Sádaba (cabecera del río, al inicio del regadío). Para la concentración de nitrato el máximo (78 mg/L) se presentó el 17 de febrero en el punto R-D-XIX, primer punto tras una presa en el Riguel que en épocas de riego elevado puede llegar a derivar por completo el flujo del río, y la mínima concentración (0 mg/L) se presentó en Sádaba el 10 de marzo de 2000.

Prácticamente en todos los puntos de muestreo en los desagües y los ríos la *CE* y la concentración de NO_3^- fueron mayores en la estación de no riego (*ENR*, 6 muestras por punto de octubre de 1999 a marzo de 2000) que en la estación de riego (*ER*, 8 muestras por punto de abril a septiembre de 2000) (Tabla 1), lo que confirma que en la estación de riego se produce una marcada dilución de las aguas de los desagües por los sobrantes del riego. Para los desagües la diferencia entre las muestras de la *ENR* y la *ER* fue de 0,16 dS/m para la *CE* y de 26 mg/L para la concentración de NO_3^- , y para los ríos las diferencias fueron de 0,21 dS/m en la *CE* y de 12 mg/L en la concentración de NO_3^- (en todos los casos significativamente diferentes de cero, $P < 0,05$). Estas diferenciales estacionales no se aprecian en la composición del agua del Canal de las Bardenas.

Evolución temporal

La Figura 2 presenta la evolución temporal de la *CE* media y la concentración de NO_3^- media de los desagües y ríos en el período de muestreo, junto con los puntos de muestreo que mostraron los valores medios máximos y mínimos.

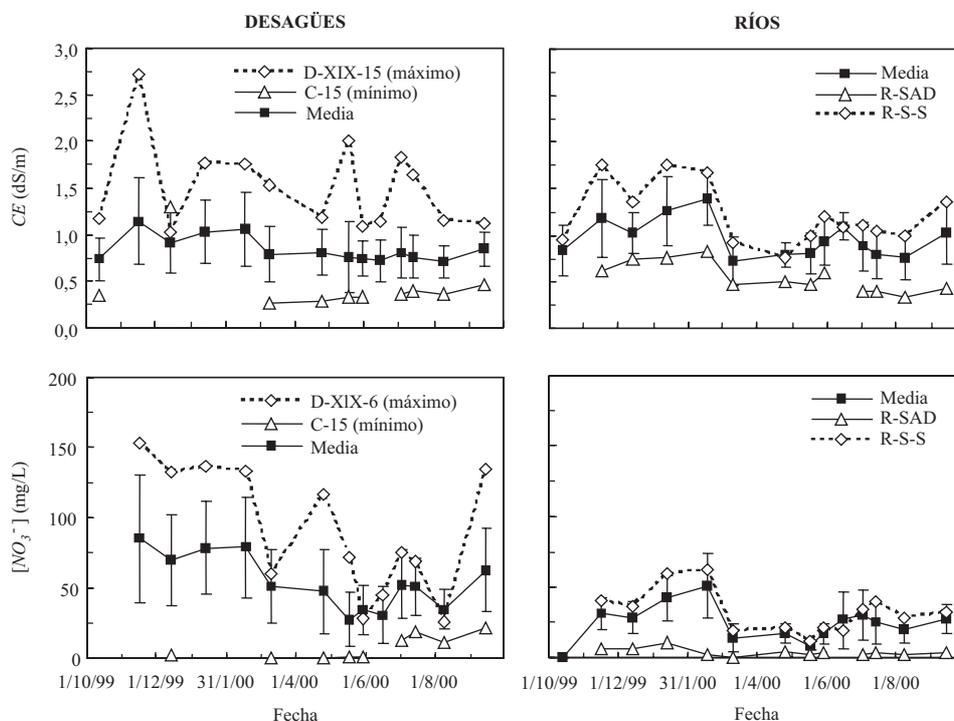


Fig. 2.—Evolución durante el año hidrológico 1999-2000, de la CE y la concentración de NO_3^- media de todos los desagües o puntos de muestreo en los ríos, con aquellos que presentaron los valores medios máximo y mínimo. Las barras representan la desviación estándar de la media en cada fecha.

Se puede apreciar que tanto en los desagües como en los puntos de muestreo en los ríos, en general, tanto los valores medios como la dispersión de los valores de CE fueron mayores de octubre a marzo (estación de no riego, *ENR*) que de abril a septiembre (estación de riego, *ER*). Durante la *ER* los sobrantes de riego diluyen las aguas de los desagües forzando valores menores de CE y concentración de nitrato y una menor dispersión de los mismos. En la *ENR*, al faltar el efecto homogeneizador, las diferencias entre desagües reflejan mejor las diferencias entre las zonas drenadas y la dispersión de los valores de CE y concentración de NO_3^- fueron mayores. Este hecho ya fue observado por Basso (1994) en el polígono de riego de Bardenas I y también por Isidoro (1999) en el de La Violada.

Se observó asimismo un aumento en la concentración de nitrato entre junio y julio, atribuible a la fertilización nitrogenada del maíz previa a esas fechas, pero sin que se llegaran a alcanzar concentraciones tan altas como las del invierno. Este aumento de la concentración de nitrato en los meses de junio y julio también fue observado por Isidoro (1999) en el polígono de La Violada (Huesca), regado por inundación y donde como en este caso el maíz recibe los mayores aportes por fertilización. Sin embargo Cavero (comunicación personal), en dos distritos de riego de Monegros II, regados por aspersión, en-

controló los picos de $[NO_3^-]$ durante los meses de abril y mayo, y lo atribuyó al abonado de presembrado de maíz.

Este distinto comportamiento está condicionado por el sistema de riego. Así, las cantidades de nitrógeno medias aplicadas al maíz fueron de 425 kg/ha en Bardenas I y 320 kg/ha en Monegros II, ya que en Bardenas los agricultores asumen unas pérdidas debido a la ineficiencia del sistema de riego, sobre todo en los suelos de saso. Además, en Bardenas I el nitrógeno de cobertera se aplicó en una sola vez (con dosis medias de 300 kg/ha), lo que produjo los picos observados en junio y julio, mientras que en Monegros II el riego por aspersión permitió su reparto en el tiempo (ferti-riego). En adición, las eficiencias de riego fueron mucho más altas en el período de aplicación de las coberteras en Monegros II [$IPI = (\text{volumen de riego} / \text{necesidades hidricas netas}) * 100$, entre 70 y 110 %] lo que disminuyó el riesgo de lavado del nitrógeno aplicado en ese momento.

La Figura 3 presenta, para cada fecha de muestreo, el cociente entre los valores medios de $[NO_3^-]$ y CE medidos en los nueve puntos de muestreo de los ríos Arba y Riguel y en los 39 puntos de muestreo de los desagües. Esta relación $[NO_3^-]/CE$ fue alta, con valores superiores a 25 (mg/L)/(dS/m) en los ríos y a 70 (mg/L)/(dS/m) en los desagües, en los meses de invierno (riegos y precipitaciones relativamente bajos), descendió por debajo de 21 en los ríos y por debajo de 60 en los desagües entre abril y mayo (riegos y precipitaciones más elevados) y ascendió paulatinamente a partir de este último mes para alcanzar un máximo de 34 en los ríos y 67 en los desagües al principio de julio (lavado parcial del abonado de cobertera aplicado a los cultivos de verano). Posteriormente, esta relación se

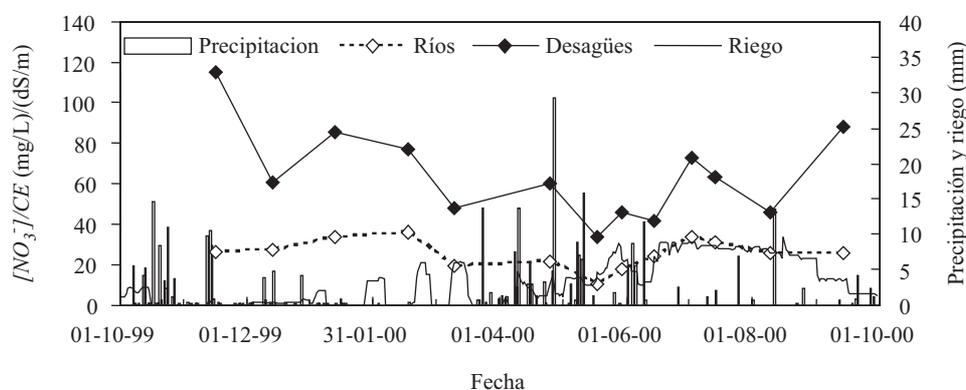


Fig. 3.—Evolución temporal de la relación $[NO_3^-]/CE$ para los ríos y desagües de la Comunidad V, los volúmenes de riego aplicados en la Comunidad n.º V de Bardenas y la precipitación medida en la estación meteorológica de Santa Anastasia.

estabilizó en torno a un valor de 25 para los ríos y 70 para los desagües, similar al obtenido al inicio del año hidrológico.

En la Figura 4 se presenta el caudal y las masas de sales y nitrato estimadas en el punto R-EST (río Riguel en su confluencia con el río Arba) en cada una de las fechas de muestreo. Aunque tanto la CE como la concentración de NO_3^- fueron más altas en invierno (ENR) que en verano (ER), las masas exportadas durante la ER fueron muy superiores

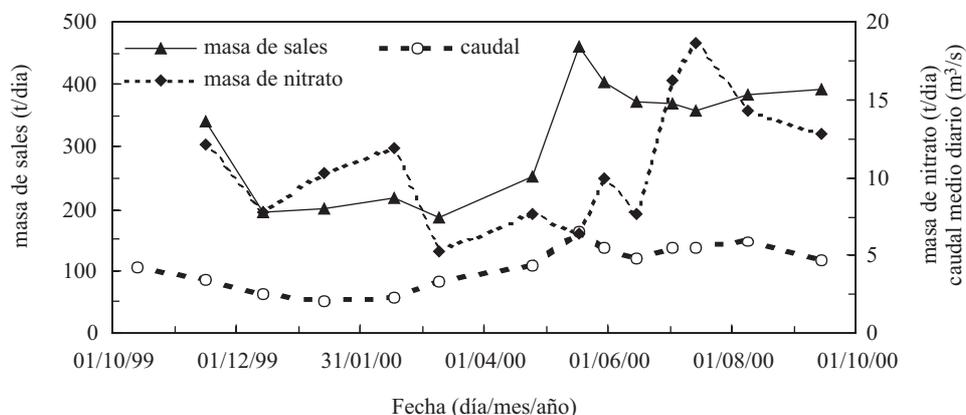


Fig. 4.—Caudal y masa de sales y nitrato diarios estimados en el punto de control R-EST para los catorce días de muestreo.

a las de la *ENR* debido al aumento del caudal del río inducido por los mayores flujos de retorno del riego. Puede observarse además cómo las curvas de caudal y masa de sales presentaron un gran paralelismo, mientras que la de la masa de nitrato presentó una variación más acusada, reflejo tanto del manejo de los fertilizantes como del ciclo natural del nitrógeno en el suelo. Estos resultados han sido constatados con anterioridad en otras zonas regables donde el maíz es un cultivo importante como el polígono de riego de Bardenas I (Basso, 1994) o el de La Violada (Isidoro, 1999).

Variabilidad espacial

Los valores medios de la *CE* y la concentración de NO_3^- del año hidrológico 1999-2000 aumentaron progresivamente a lo largo del río Riguel desde unos valores mínimos en cabecera (R-SAD: $CE = 0,55$ dS/m, $[NO_3^-] = 4$ mg/L), hasta unos valores máximos o próximos al máximo en la desembocadura (R-EST: $CE = 1,2$ dS/m, $[NO_3^-] = 32$ mg/L) o en el propio río Arba (ARBA: $CE = 1,3$ dS/m, $[NO_3^-] = 35$ mg/L) (Tabla 2). La variabilidad entre fechas para todos los puntos de muestreo fue mayor para la concentración de NO_3^- que para la *CE*, lo que sugiere que en los aportes al río existió también una mayor variabilidad entre fechas para la concentración de NO_3^- que para la *CE*. Si se acepta que la *CE* es un parámetro conservativo que refleja el efecto del riego y las lluvias, el *CV* más alto para $[NO_3^-]$ que para la *CE* indica que el primero se vio afectado, además de por el manejo del riego, por otros factores que estarían relacionados con el ciclo del nitrógeno y el manejo de los fertilizantes.

El mayor incremento relativo de la concentración de NO_3^- media se produjo entre R-SAD (4 mg/L), aguas arriba del regadío, y R-CAL (18 mg/L), primer punto de muestreo dentro de la Comunidad de regantes, lo que es atribuible a los retornos del riego con concentraciones más altas de nitrato. En el punto R-D-XIX se obtiene la concentración media máxima de nitrato (37 mg/L), debido a que está situado tras una presa que en la época de riego llega a derivar todo el caudal del río, provocando que el agua circulante por este punto tenga un origen fundamentalmente subterráneo (Fig. 5).

Tabla 2

Media, desviación estándar (*DE*), coeficiente de variación (*CV*), máximo y mínimo de los valores medios de la *CE* y la concentración de NO_3^- en los puntos de muestreo del Riguel, Arba y Barranco de Valareña de las catorce fechas de muestreo

	CE (dS/m, 25 °C)					Concentración de NO_3^- (mg/L)				
	media	DE	CV	máximo	mínimo	media	DE	CV	máximo	mínimo
Riguel:										
R-SAD	0,55	0,16	29	0,82	0,33	4	3	72	10	0
R-CAL	0,77	0,21	27	1,27	0,54	18	9	48	37	6
R-PRE	0,73	0,19	26	1,24	0,48	19	9	50	35	5
R-D-XIX	0,89	0,22	25	1,29	0,58	37	22	59	78	9
R-AZUD	0,94	0,21	22	1,42	0,67	29	12	41	52	12
R-S-S	1,21	0,32	26	1,75	0,76	26	13	67	72	6
R-SAB	1,21	0,28	23	1,64	0,77	29	17	57	59	9
R-EST	1,17	0,26	22	1,57	0,83	32	15	48	62	11
Arba	1,25	0,22	18	1,68	0,98	35	14	39	58	11
Valareña	1,55	0,63	41	2,83	0,70	25	18	71	61	8
C. Bardenas	0,30	0,05	16	0,52	0,19	2	1	68	4	0

Los datos del Canal de Las Bardenas corresponden al período 1972-1997.

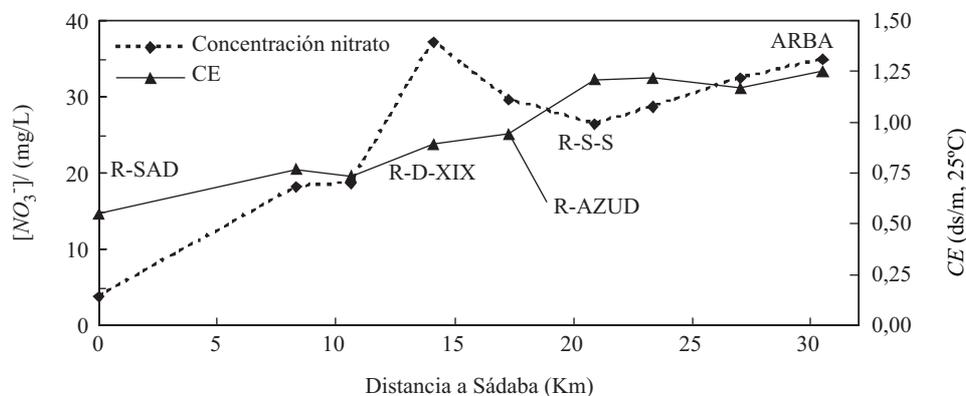


Fig. 5.—Evolución espacial de los valores medios de *CE* y concentración de NO_3^- del año hidrológico 1999-2000 en los ríos Riguel (8 puntos) y Arba (1 punto).

El mayor incremento relativo de la *CE* media se produjo asimismo entre R-SAD y R-CAL por el efecto de los retornos del riego ya señalado. Sin embargo, el mayor incremento absoluto se produjo entre R-AZUD y R-S-S (incremento de 0,27 dS/m) (Fig. 5). Esto es debido a que el río Riguel recibe entre estas estaciones las aguas del barranco de Valareña (Fig. 1) por el que circulan caudales importantes (especialmente en la época de riego) y relativamente salinos (*CE* media = 1,55 dS/m), ya que drena suelos desarrollados

sobre materiales más salinos del terciario continental. En contraste con la predominancia del maíz en el área drenada por el Riguel, la salinidad de los suelos drenados por el barranco de Valareña condiciona la distribución de cultivos, siendo menor la presencia de maíz por ser un cultivo sensible a la salinidad. La menor superficie de maíz y el hecho de que la salinidad sea el principal factor limitante de la producción (Basso, 1994) hicieron que la cantidad de fertilizantes nitrogenados aplicados en esta área fueran menores que en el área del Riguel. Ésta fue probablemente una de las razones por las que la concentración media de nitrato fue incluso ligeramente menor en R-S-S (aguas abajo del barranco de Valareña) que en R-AZUD (aguas arriba del barranco), cuando la tendencia en este tramo inferior del río es a aumentar (Tabla 2).

Los resultados que se presentan en la Tabla 3 confirman las consideraciones anteriores, mostrando que la *CE* del barranco de Valareña superó a la del río Riguel aguas arriba del mismo (R-AZUD) tanto en la estación de riego como, principalmente, en la de no riego, mientras que la concentración de nitrato fue similar en ambos puntos en la estación de no riego y 10 mg/L menor en el barranco que en el río en la estación de riego.

Tabla 3

Valores medios de la *CE* (dS/m, 25 °C) y la concentración de nitrato ($[NO_3^-]$, mg/L) de las estaciones de no riego (*ENR*) y riego (*ER*) del año hidrológico 1999-2000 en los puntos R-AZUD y barranco Valareña

Punto	<i>CE</i> (dS/m) (25 °C)		$[NO_3^-]$ (mg/L)	
	<i>ENR</i>	<i>ER</i>	<i>ENR</i>	<i>ER</i>
R-AZUD	1,40	0,90	36	26
Bco. Valareña	2,03	1,20	37	16
Diferencia	0,63	0,30	1	-10

Aguas abajo de la desembocadura del barranco de Valareña en el río Riguel continúan llegando aportes de la densa red de drenaje trazada sobre los glaciares cuaternarios y de los barrancos laterales que drenan materiales terciarios más salinos, por lo que la *CE* en este tramo del río presentó ligeras variaciones que dependieron de los porcentajes de mezcla de estas aguas, mientras que ya se ha indicado que la concentración de nitrato mantuvo un ascenso suave pero continuo.

Análisis factorial y clasificación de los desagües

El análisis en componentes principales sobre los valores medios de los iones considerados reveló la existencia de una primera componente ligada a la concentración de los iones Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- y SO_4^{2-} y de una segunda ligada a la concentración de Ca^{2+} y NO_3^- . La tercera componente discriminó entre la concentración de Ca^{2+} y NO_3^- (al estar positivamente correlacionada con Ca^{2+} y negativamente con NO_3^-). Al girar estos ejes por el pro-

cedimiento de varimax (Harman, 1967; Basso *et al.*, 1992; Goovaerts, 1993) el segundo factor apareció claramente correlacionado con la concentración de NO_3^- y el tercero con la concentración de Ca^{2+} , mientras el primero mantuvo su relación con los otros cuatro iones (Tabla 4). Por tanto, en los puntos estudiados, las concentraciones de Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- y SO_4^{2-} (factor 1), la concentración de Ca^{2+} (factor 3) y la concentración de NO_3^- (factor 2) fueron prácticamente independientes. Estas tres primeras componentes principales explicaron el 95,1 % de la varianza total de los datos (Tabla 4). La inclusión de la *CE* y el *RAS* en el análisis no aportó más información por estar ambas variables muy ligadas a la primera componente. La presencia de estos factores parece indicar que la concentración de Ca^{2+} estuvo controlada por una fuente diferente a la de los otros iones (la calcita) y que la concentración de NO_3^- siguió una pauta diferente, probablemente dominada por las aportaciones de fertilizantes. La mayor parte de la variabilidad entre desagües viene explicada por la disolución de minerales más solubles que la calcita (los cloruros y sulfatos del factor 1).

Tabla 4

Coefficientes de correlación entre las variables y las tres primeras componentes principales (CP) y entre las variables y los tres factores obtenidos por la rotación varimax de las componentes principales para los 39 puntos de muestreo en los desagües de la Comunidad V de Bardenas

Variable	1. ^a CP	2. ^a CP	3. ^a CP	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Ca^{2+}	0,402	0,835	0,352	0,129	0,469	0,863
Mg^{2+}	0,922	-0,153	-0,284	0,938	0,248	-0,109
Na^+	0,941	-0,264	-0,028	0,977	0,004	0,022
Cl^-	0,960	-0,128	0,066	0,952	0,049	0,181
SO_4^{2-}	0,912	-0,101	0,213	0,893	-0,035	0,299
NO_3^-	0,309	0,873	-0,360	0,060	0,938	0,323
% Varianza	62,4	26,3	6,4	59,3	19,4	16,4

En la última fila se presenta el porcentaje de la varianza explicado por cada componente o factor. Se marcan en negrita los coeficientes de correlación superiores a 0,80.

Se ha optado por presentar una clasificación en ocho clases, que dan una idea bastante precisa de las diferencias entre los desagües de la comunidad V. Hay dos clases principales, la clase 1 que incluye a dieciséis puntos de control y la clase 5 que incluye a catorce puntos de control; de las otras seis clases, cuatro (clases 3, 4, 6, 8) contienen un solo punto, la clase 7 tiene dos y la clase 2 tiene tres. En la Figura 6 se presentan los elementos de las distintas clases sobre el gráfico *CE-RAS* y en la Figura 7 las mismas clases sobre el gráfico de las dos primeras componentes principales. La Tabla 5 presenta los valores medios de *CE*, *RAS* y $[\text{NO}_3^-]$ para las clases establecidas. En la Figura 1 se recoge la distribución sobre el mapa de la Comunidad de estas clases.

La clase 1 corresponde a la zona Este de la comunidad V, comprende todos los desagües analizados de los sectores XXVIII, XXX y XXXII (D-XXVIII-5, D-XXVIII-7, D-XXX-1, D-XXX-3, D-XXX-4, D-XXX-6, D-XXXII-3, D-XXXII-3-1, D-XXXII-8 y

Tabla 5

Valores medios de CE , RAS y concentración de NO_3^- de las ocho clases establecidas. Letras diferentes dentro de una misma columna indican diferencias significativas entre clases (prueba de Duncan $P < 0,05$)

Clase (n.º desagües)	CE (dS/m)	RAS (mmol _c /L)	NO_3^- (mg/L)
Clase 1 (16)	0,74 b	0,84 a	76 b
Clase 2 (3)	0,67 b	1,46 ab	39 ab
Clase 3 (1) D-XIX-15	1,94 e	5,01 e	74 b
Clase 4 (1) D-XIX-13	1,30 c	4,52 d	28 ab
Clase 5 (14)	1,17 c	2,37 b	73 b
Clase 6 (1) C-9	1,60 d	3,37 c	68 b
Clase 7 (2)	1,27 c	1,98 b	131 c
Clase 8 (1) C-15	0,30 a	0,52 a	1 a

Detrás de cada clase figura entre paréntesis el número de desagües que la componen.

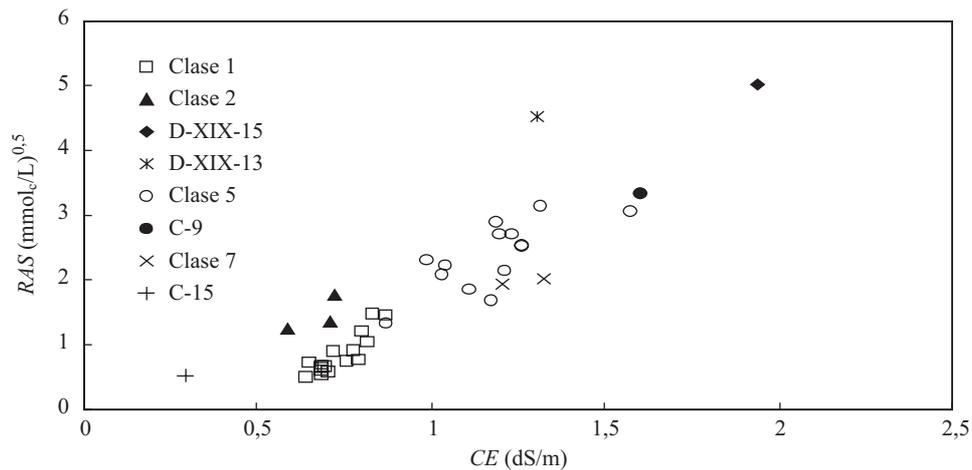


Fig. 6.—Representación de la clasificación de los desagües estudiados por sus valores de CE y RAS .

D-XXXII-14) y todos los puntos de muestreo sobre los colectores C-13 (C-13 y C-13-A) y C-14 (C-14, C-14-A, C-14-B). Estos desagües se ubican en el saso de Miralbueno y drenan suelos denominados por Martínez-Beltrán (1978) como *sasos*. Sólo los dos colectores de mayor longitud (C-13 y C-14) atraviesan zonas de suelos denominados por Martínez-Beltrán (1978) como '*valle fluvio-coluvial con fase ligera salino-alcalina*', si bien la mayor parte de la superficie que drenan es de saso. Estos puntos de muestreo se caracterizan (Tabla 5 y Figura 7) por un valor bajo de CE (0,74 dS/m) y RAS (0,84 (mmol_c/L)^{0.5}) y una alta concentración de nitrato (76 mg/L). Tienen valores bajos de la primera componente principal (asociada al Cl^- , SO_4^{2-} , Mg^{2+} y Na^+) y medios-altos de la segunda, asociada al Ca^{2+} y NO_3^- (Fig. 7).

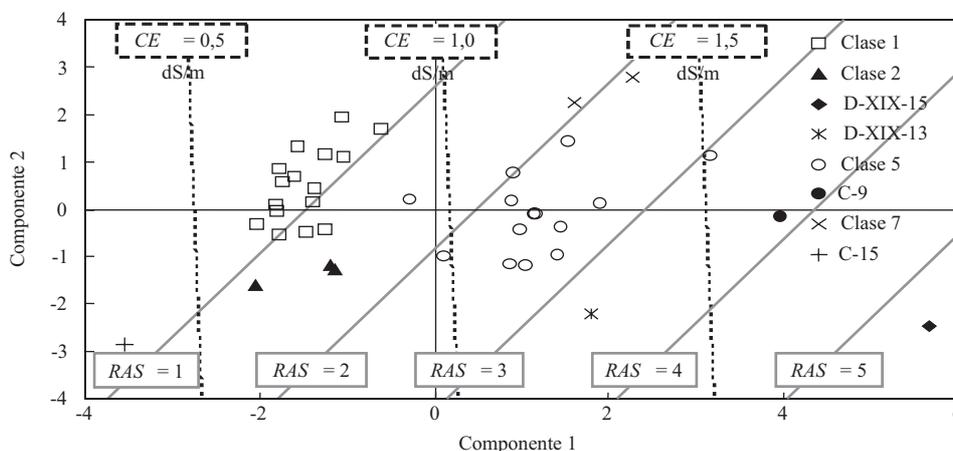


Fig 7.—Representación de las clases sobre el gráfico de las dos primeras componentes principales. Las isoclasas de CE y RAS se han obtenido por regresión sobre las componentes principales.

La clase 2 (desagüe D-XXV-3 y los dos puntos sobre el colector C-12: C-12 y C-12-A) es muy similar a la clase 1 pero con valores más bajos de la segunda componente. Presenta un valor de RAS ($1,46 \text{ (mmol/L)}^{0,5}$) bastante mayor que la clase 1 y una concentración de nitrato claramente inferior (39 mg/L) (Tabla 5, Fig. 7). Estos desagües se encuentran en la zona central de la mitad norte de la comunidad, en un área dominada por el riego por aspersión (puntos D-XXV-3 y C-12-A). Drenan superficies del saso de Miralbueno y de los valles aluviales por los que atraviesan. En el caso de C-12, el desagüe atraviesa por una zona con problemas de drenaje (Basso, 1994).

Las clases 3 (desagüe D-XIX-15) y 4 (D-XIX-13) se caracterizan (Tabla 5, Figura 6) por tener los valores más altos de RAS , 5 y $4,5 \text{ (mmol/L)}^{0,5}$, respectivamente. El desagüe D-XIX-15 presenta además el valor máximo de CE ($1,94 \text{ dS/m}$) y D-XIX-13 uno de los más elevados ($1,30 \text{ dS/m}$). El desagüe D-XIX-15 discurre paralelo al río Riguel por su margen derecha y desemboca en el Barranco de Valareña poco antes de su confluencia con el Riguel. La superficie que drena corresponde mayoritariamente al aluvial del Riguel y la parte inferior de su curso está clasificada como 'Llamura del Riguel (salino-alkalina)-Terraza' (Martínez-Beltrán, 1978). Basso (1994) identificó en su parte final un área deprimida con problemas de drenaje. El desagüe D-XIX-13 discurre paralelo a D-XIX-15 al oeste de aquél, drena terrenos del saso de Miraflores y del mismo valle aluvial por el que discurre, y en su tramo bajo domina el cultivo de arroz (como en el de D-XIX-15). La principal diferencia entre estos desagües se da en la concentración de nitrato (74 mg/L en D-XIX-15 frente a 28 mg/L en D-XIX-13) que es siempre mayor en el primero, circunstancia que se mantiene también durante la campaña de riego. La gran diferencia en CE y RAS de estos desagües con el resto (tabla 5) puede estar identificando una de las áreas con mayores problemas de salinidad y sodicidad.

La clase 5, el otro gran grupo, se caracteriza por valores altos de la primera componente y medios-altos de la segunda, con valores más altos de CE ($1,17 \text{ dS/m}$) y de RAS

(2,37 (mmol/L)^{0.5}) que la clase 1 y concentraciones análogas de nitrato (73 mg/L) (Tabla 5, Fig. 7). Incluye 14 puntos de muestreo de la mitad oeste de la comunidad: los puntos D-XXVI-10 y D-XXVII-4 situados sobre el mismo desagüe, el desagüe D-XXIX-4, los dos puntos de muestreo sobre el colector C-11 (C-11 y C-11-A), todos los desagües muestreados de los sectores XVIII y XIX (D-XVIII-3, D-XIX-2, D-XIX-2-2, D-XIX-5, D-XIX-7 y D-XIX-11) con excepción de dos, los desagües D-XXVI-4 y D-XXIV-2 y el primer punto sobre el colector C-9 (C-9-A). Todos estos desagües de los sectores XXVIII y XIX drenan tierras del saso de Miraflores, aunque algunos (D-XIX-2, D-XIX-11 y D-XVIII-3) atraviesan largos recorridos de valles aluviales. El punto C-9-A, también en el saso de Miraflores, está situado a pocos kilómetros de la salida del Lagunazo de Moncayuelo, un lago de origen natural localizado en el saso de Miraflores. Los desagües D-XXIV-2 y D-XXVI-4 drenan la parte noroeste del saso de Miralbueno, aunque los dos atraviesan tierras clasificadas como *valles aluviales y con ligera fase salino-alcalina* (Martínez-Beltrán, 1978). El desagüe D-XXIV-2 se sitúa en una posición casi intermedia entre las clases 1 y 5 (Figs. 6 y 7).

La clase 6 está formada por el colector C-9 en su desembocadura, que drena terrenos del saso de Miraflores aunque gran parte de su cuenca la forma su valle aluvial, en el que Basso (1994) identificó problemas de *piping* y de drenaje. Presenta valores altos de *CE* y *RAS* y concentraciones intermedias de nitrato (Tabla 5, Fig. 7).

La clase 7 la componen los desagües D-XVIII-9 y D-XIX-6, al noroeste de la comunidad en el saso de Miraflores. Son desagües parecidos a los de la clase 5, de la que se distinguen por tener una concentración de nitrato muy alta (131 mg/L).

Finalmente, la clase 8 la compone el colector C-15 antes de la incorporación del desagüe D-XXX-3, en el saso de Miralbueno. Presenta un agua muy poco mineralizada y con una composición muy parecida a la del Canal de Bardenas, del que probablemente recibe toda su agua en la estación de no riego. Prácticamente está libre de nitrato (1 mg/L de media).

Esta clasificación separa claramente las aguas de los desagües de la zona este de la Comunidad procedentes del saso de Miralbueno (clase 1) que presentaron salinidad baja y concentración de nitrato alta, de los de la zona oeste (clase 5), que drenan el saso de Miraflores y presentan grandes recorridos sobre la zona del aluvial, que tuvieron valores más altos de *CE* y *RAS* y concentraciones de nitrato similares. Además separa tres desagües (clase 3, clase 4 y clase 6) de salinidad elevada que identifican una de las áreas con mayores problemas de salinidad y sodicidad y dos desagües (clase 7) con las concentraciones más elevadas de nitrato para las que de momento no se dispone de ninguna explicación y que será necesario estudiar con más detalle.

CONCLUSIONES

Los factores naturales y antrópicos que influyen en la calidad de las aguas de drenaje de la Comunidad V de Bardenas son múltiples y, hasta cierto punto, están interrelacionados entre sí, ya que los antrópicos dependen en parte de los naturales.

El riego es un condicionante fundamental del régimen hídrico natural del sistema de drenaje en la Comunidad V de Bardenas que provoca, contranatura, que los mayores caudales circulantes se produzcan en los meses estivales debido a las bajas eficiencias del riego y,

consecuentemente, a sus elevados flujos de retorno (aguas de percolación y aguas de cola de las acequias). Las prácticas del riego y, en menor medida, las lluvias son las principales responsables de la variabilidad espacio-temporal observada en la concentración de nitrato y en la *CE*. Así, las concentraciones más elevadas de sales y nitratos se alcanzaron en invierno, época de caudales más bajos, descendieron en primavera debido al inicio de los riegos y a las importantes lluvias que se produjeron durante el año de estudio, y alcanzaron valores intermedios en verano debido a las elevadas aplicaciones de riego y abonado.

La excelente calidad del agua del canal de Bardenas, los rasgos geológicos de los suelos (en su mayor parte sasos de baja salinidad) y las bajas eficiencias del riego en estos suelos de saso producen unos efluentes del riego en general de baja salinidad. Los desagües de la Comunidad V de Bardenas se caracterizaron durante el año hidrológico 1999-2000 por un valor medio de *CE* bajo (0,84 dS/m) y una concentración media de nitrato bastante alta (54 mg/L). Esta alta concentración de nitrato en los desagües del polígono hace que la concentración de nitrato en el río Riguel aumente desde Sádaba hasta su desembocadura casi en ocho veces (desde 4 mg/L en Sádaba hasta 32 mg/L en R-EST).

La salinidad del río Riguel es baja o moderada y no supone un problema de contaminación, pero la concentración relativamente elevada de nitrato refleja que el manejo del riego (baja eficiencia en los sasos) y de los fertilizantes (dosis entre un 40 % y 50 % superior a las recomendadas en el caso del maíz) no es el óptimo en esta zona regable.

El análisis factorial sobre las concentraciones de los iones principales (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} y NO_3^-) en las aguas de los desagües durante la estación de no riego revela la existencia de tres factores independientes ligados a la salinidad global (Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- y SO_4^{2-}), el calcio y el nitrato. La utilización de técnicas de clasificación automática sobre esas concentraciones permite discriminar entre los desagües que proceden de las terrazas altas (sasos), con valores bajos de *CE* y *RAS* y los que drenan las terrazas aluviales que presentan valores más altos de *CE* y *RAS*.

Aunque los retornos de riego de la Comunidad V no presentan problemas de salinidad (*CE*) o sodicidad (*RAS*), la concentración de nitrato, en cambio, es alta (con una media superior a 50 mg/L) en todos los desagües. Aunque no aparecen diferencias significativas, en general, en la concentración de NO_3^- de los desagües de los sasos y de los aluviales, las diferencias en eficiencias de riego, distribución de cultivos y volúmenes de drenaje entre los suelos de saso y los aluviales permite suponer que hay una mayor contribución de los sasos a la carga total de nitrógeno en las aguas de drenaje. Debe profundizarse en el distinto comportamiento de las clases establecidas durante la estación de riego, en cuanto a aporte de sales y especialmente de nitrato, y en relación con la distribución de los cultivos y las prácticas de abonado y de riego para establecer las causas de la elevada concentración de nitrato y las prácticas que puedan reducirla.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Plan Nacional de I+D y fondos FEDER de la UE, Proyecto 2FD1997-0547, con la colaboración de la Comunidad V de Regantes del Canal de las Bardenas, sin la que este trabajo no hubiera sido posible. Se agradece al Consejo Superior de Investigación y Desarrollo de la Diputación General de Aragón la concesión de una beca y la colaboración de la Confederación Hidrográfica del Ebro.

SUMMARY

Drainage water quality in the Fifth Bardenas Project Irrigation District (Zaragoza)

Irrigation return flows are a potential source for water and soil pollution whose actual impact must be quantified. In this work the salinity and nitrate concentration in irrigation return flows from the 15,498 ha of 5th Bardenas Project Irrigation District is presented. Forty nine sites of the drainage network of the District (39 in open ditches and 10 in rivers) were sampled (14 dates) monthly during the 1999-2000 hydrological year and fortnightly from May to July. Drainage waters showed a low mean electrical conductivity (*CE*) of 0.84 dS/m and a rather high mean nitrate concentration of 54 mg/L (12 mg N-*NO*₃/L). In the case of control points in the river the average *CE* was higher (0.97dS/m) and the nitrate concentration was lower (27 mg/L) than in drainage waters. Winter *CE* and nitrate concentration values were higher than those of the irrigation season, indicating that the drainage waters were diluted by the tail waters during the irrigation period. However the nitrate and the salt mass exported were larger during the irrigation season due to the higher water flow. The factor analysis performed on the ionic concentrations of the winter drainage waters yields three independent factors related to global salinity (*Mg*²⁺, *Na*⁺, *Cl*⁻, and *SO*₄²⁻), calcium concentration and nitrate concentration. Cluster analysis of the winter waters discriminated two main drainage groups, the first containing the drains from the "mesas" (locally known as "sasos"), with low *CE* (0.74 dS/m) and *RAS* (Sodium Adsorption Ratio: 0.84 (mmol/L)^{0.5}) values, and the second containing the drains from the alluvial plains, with higher *CE* (1.17 dS/m) and *RAS* (2.37 (mmol/L)^{0.5}) values. The drainage waters of the 5th Bardenas Irrigation District exhibit low salinity and sodicity values, a clear summer dilution due to irrigation tail waters and a high nitrate concentration. Future research activities in this District should therefore focus on the improvement of irrigation and nitrogen fertilization management.

Key words: irrigation return flow, water quality, salinity, nitrate concentration, spatial variability, temporal variability.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BASSO L. A., 1994. Los retornos salinos del polígono de riego Bardenas I y su contribución a la salinización de los ríos Arba y Riguel. Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza.
- BASSO L. A., MACHÍN J., PELLICER F., 1992. Análisis estadístico multivariante aplicado a la calidad del agua de drenaje. *Invest. Agr.: Prod. Prot. veg.* 7(2), 227-244.
- BETRÁN J., PÉREZ-BERGES M., 1994. Respuesta del maíz al abonado: Análisis plurianual de resultados. Información Técnica 8/94. Departamento de Agricultura. Gobierno de Aragón.
- BOURAOUI F., TURPIN N., BOERLEN P., 1999. Trend analysis of nutrient concentration and loads in surface water in an intensively fertilized watershed. *J. Environ. Qual.* 28, 1878-1875.
- CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO, 2001a. Datos Básicos de la Confederación Hidrográfica del Ebro. Publicado en Internet, disponible en la dirección: <http://oph.chebro.es/DatosBasicosCHE.html>.
- CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO, 2001b. Resultados Analíticos, Red ICA. Publicado en Internet, disponible en la dirección: http://oph.chebro.es/DOCUMENTACION/Calidad/pa3_6.htm.
- FERERES E., CEÑA F., 1997. Social benefits and environmental constraints of irrigation in an area of water scarcity. Proceedings 18th European Regional Conference "Water - an economic good". Oxford, UK, pp. 128-136.
- GOOVAERTS P., 1990. Spatial orthogonality of the principal components computed from cogeoregionalized variables. *Math. Geol.* 25(3), 281-302.
- HARMAN H. H., 1967. Modern Factor Analysis. The University of Chicago Press, 474 pp.
- ISIDORO D. 1999. Impacto del regadío sobre la calidad de las aguas del barranco de La Violada (Huesca): salinidad y nitratos. Tesis doctoral, Universidad de Lleida.
- JAYNES D.B., HATFIELD J.L., MEEK D.W., 1999. Water quality in Walnut creek watershed: herbicides and nitrate in surface waters. *J. Environ. Qual.* 28, 45-59.
- JÚDEZ L., 1989. Técnicas de análisis de datos multidimensionales. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 301 pp.
- KANWAR R.S., WEBB B., 1997. Nonpoint sources of water contamination and their impacts on sustainability. Freshwater contamination. Proceedings of an international symposium of the Fifth Scientific Assembly of the International Association of Hydrological Sciences, Rabat, Morocco, pp. 187-192.

- KÜCKE M., KLEEBERG P., 1997. Nitrogen balance and soil nitrogen dynamics in two areas with different soil, climatic and cropping conditions. *Eur. J. Agr.* 6, 89-100.
- LECINA S., PLAYÁN E., ISIDORO D., DECHMI F., CAUSAPÉ J., FACÍ J.M., LAPLAZA J.M., 2001. Evaluación de los riegos de la Comunidad de Regantes V del Canal de Bardenas. XIX Congreso Nacional de Riegos. 12-14 de junio 2001. Zaragoza, pp. 169-170.
- MARTÍNEZ-BELTRÁN J., 1978. Drainage and reclamation of salt-affected soils in the Bardenas area, Spain. International Institute for Land Reclamation and Improvement/ILRI, Wageningen, 322 pp.
- ORUS F., QUÍLEZ D., BETRÁN J., 2000. El código de buenas prácticas agrarias. Fertilización nitrogenada y contaminación por nitrato. Información Técnica 93. Departamento de Agricultura, Gobierno de Aragón, 40 pp.
- REAL DECRETO 1138/1990, de 14 de septiembre por el que se aprueba la Reglamentación Técnico-Sanitaria para el abastecimiento y control de calidad de las aguas potables de consumo público. BOE núm. 226, de 20 de septiembre de 1990, pp. 27488-27497.
- SCHILLING K.E., LIBRA R.D., 2000. The relationship of nitrate concentrations in streams to row crop land use in Iowa. *J. Environ. Qual.* 29, 1846-1851.