II Jornada Técnica

GESTIÓN EFICAZ DEL RIEGO POR ASPERSIÓN. ÚLTIMOS AVANCES TÉCNICOS Y MEDIOAMBIENTALES

MONÓGRAFICO RIEGOS DEL ALTO ARAGÓN | JUNIO 2011

SUMARIO

EDITORIAL 1

MODERNIZACIÓN DEL REGADÍO: LA APUESTA POR EL INCREMENTO DE LA PRODUCTIVIDAD Y EL COMPROMISO AMBIENTAL. Gonzalo Arguilé Laguarta 2

UNA JORNADA TÉCNICA NECESARIA. José González Bonillo 3

MODERNIZACIÓN DE REGADÍOS: VENTAJAS Y LIMITACIONES. Sergio Lecina, Daniel Isidoro, Enrique Playán y Ramón Aragüés 5

LA PROGRAMACIÓN DEL RIEGO POR ASPERSIÓN. José María Faci González 9

FERTILIZACIÓN DEL MAÍZ EN RIEGO POR ASPERSIÓN. Ramón Isla y Dolores Quílez 14

CALIDAD DEL AGUA PARA EL RIEGO: EFECTOS SOBRE PLANTAS Y SUELOS. Ramón Aragüés 18

MINIMIZACIÓN DE IMPACTOS EN LA AGRICULTURA DE REGADÍO. Daniel Isidoro 24

ESTUDIOS REALIZADOS EN RIEGOS DEL ALTO ARAGÓN. Farida Dechmi, Daniel Isidoro, Maria Balcells, Ignacio Clavería, Ahmed Skhiri y Yolanda Gimeno 33

Este Boletín Monográfico es resultado de la II Jornada Técnica titulada «Gestión eficaz del riego por aspersión. Últimos avances técnicos y medioambientales» incluido en el Programa Plurirregional de formación convocatoria 2010 coordinado por FENACORE y financiado por el Fondo Social Europeo y el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino. También gracias a la colaboración del Parque Tecnológico Walqa.

Monográfico: Riego por aspersión. Noviembre de 2010 **Edita:** Riegos del Alto Aragón. Avenida Ramón y Cajal n.º 96. 22006 Huesca. Teléfono: 974 226 968 Fax: 974 238 035 e-mail: comunicación@cg-riegosdelaltoaragon.es **Director:** César Trillo Guardia **Coordinación:** Yolanda Gimeno y Sergio Lecina **Consejo de redacción:** Ramón Aragües, Maria Balcells, Ignacio Clavería, José María Faci Daniel Isidoro, Farida Dechmi, Ramón Isla, Sergio Lecina, Dolores Quílez, Enrique Playán y Ahmed Skhiri **Diseño, maquetación e impresión:** Tipolínea, S.A. Depósito Legal: HU-61-2010.

EDITORIAL

Por segundo año consecutivo la Jornada Técnica de Riegos del Alto Aragón sirvió para tender puentes entre la investigación, la innovación, el desarrollo y las necesidades concretas y cotidianas de regantes, técnicos y empresas.

Se encuadró dentro del Programa Plurirregional de formación convocatoria 2010 coordinado por FENACORE y financiado por el Fondo Social y Europeo y el Ministerio de Medio Ambiente Medio Rural y Marino. También contó con la inestimable la colaboración de Walqa que puso a nuestra disposición todos sus recursos humanos y materiales.

Su organización responde a la voluntad de esta Junta de Gobierno de apostar por la formación y la innovación Nos desenvolvemos en tiempos de crisis, el sector agrario y especialmente el regadío ve como sus enormes inversiones en modernización de regadíos no se ven reflejadas en la rentabilidad de las explotaciones. Sin embargo estamos convencidos que sólo a través del trabajo bien hecho existen posibilidades de éxito futuro.

Pretendemos por tanto dar una visión técnica de cómo gestionar de forma eficaz nuestros regadíos. Todos los ponentes, de reconocido prestigio internacional, fueron los verdaderos protagonistas de la Jornada en la que se quiso englobar las cuestiones medioambientales como un aspecto más de la gestión del riego.

Su realización fue posible gracias a los años de fructífera cooperación con la Unidad de Suelos y Riegos del CITA-DGA.

La Junta de Gobierno

MODERNIZACIÓN DEL REGADÍO: LA APUESTA POR EL INCREMENTO DE LA PRODUCTIVIDAD Y EL COMPROMISO AMBIENTAL

GONZALO ARGUILÉ LAGUARTA. *Consejero de Agricultura y Alimentación.*

En primer lugar quiero agradecer la invitación de Riegos del Alto Aragón en la inauguración de estas jornadas técnicas sobre «Gestión eficaz del riego por aspersión».

Estoy seguro que encuentros como estos son precisos e indispensables para adquirir nuevos conocimientos técnicos y tecnológicos sobre el riego, además de corroborar un empeño que creo que todos los que nos reunimos hoy aquí compartimos: la apuesta ferviente por la modernización de nuestros regadíos.

Nuestra constancia en torno a este ideal la hemos demostrado con creces en la última década, ya que, desde que se pusiera en marcha el Plan Nacional de Regadíos, en Aragón, Administración y regantes hemos modernizado más de 260.000 hectáreas de las 460.000 existentes.

Aquí no debe finalizar nuestro empeño, sino que debemos hacer todo lo posible por intentar que en la próxima década nuestras tierras cuenten con todos los sistemas de riego modernizados, ya que sería una respuesta importante ante la sociedad que demanda un uso mejor del agua y la Directiva Marco del Agua en Europa.

Aunque también espero que esta misma sociedad sepa que estos esfuerzos son esfuerzos procedentes principalmente de los regantes que invierten en procesos de modernización, lo que demuestra el compromiso de los mismos en torno a la eficiencia y ahorro de consumo de agua, acallando las voces que tachan a nuestra profesión de «despilfarradora» y «maltratadora ambiental». De hecho, gracias a estas inversiones hemos conseguido un ahorro que supera el 20% de los recursos que se usaban hace 10 años en el regadío.

Todo ello dignificando la figura de nuestro agricultor y provocando una incorporación de nuevos agricultores en las comarcas en las que la creación y la modernización del riego imperan en el paisaje.

La importancia de los cultivos en regadío no es una invención, sino una realidad: el 75% de la Producción Final Agrícola se obtiene en el 22% de la Superficie Agraria útil, que es la superficie regable.

El regadío aumenta seis veces el valor bruto medio de la producción en relación con el secano, y permite introducir nuevos cultivos a nuestros mercados. Estos factores suponen el aumento no sólo de la población rural, sino también de la industrial, lo que induce a un incremento del consumo y la posibilidad de generar riqueza. Todo ello crea un sistema de autoabastecimiento de la alimentación pública y un descenso de las importaciones procedentes de determinados países que no disponen de la misma escala de valores y exigencias europeos de seguridad alimentaria y calidad productiva.

Creo que todos estos argumentos que acabo de citar son suficientes para justificar la necesidad de una política hidráulica activa en nuestra comunidad, como la que llevamos actualmente en los procesos de modernización, y por supuesto, también de creación. Este interés no es un capricho, sino una necesidad histórica que se justifica por varias razones de peso: dos tercios del territorio aragonés registra una media pluviométrica anual de 290 mm, cercana a la media de las zonas desérticas. Eso lo saben perfectamente los regantes, unos profesionales que sufren en sus propias carnes los periodos de sequía que afectan a sus cultivos y sus rentas. De ahí que ellos mismos sean los primeros concienciados en tomar medidas, como he indicado al comienzo de mi intervención.

Es por esto que mi problema y preocupación sean los regantes y mi compromiso con ellos. Pero no sólo es mi problema, es el de Aragón y el de su economía, cada día más dependiente del desarrollo rural y la agroalimentación.

Debemos seguir insistiendo en la necesidad de determinadas obras de regulación que tenemos atascadas y por las que lucharemos para que salgan adelante, como es el caso de Biscarrués. No podemos seguir con esta paralización, ya que está ocasionando serias ralentizaciones y condiciona el resto de obras en ejecución por las que no circulará nunca agua de no ser que se apruebe esta obra hidráulica. Por ello solicitaré al Ministerio que vuelque todos sus esfuerzos en conseguir dicho objetivo, ya que una vez se apruebe su declaración de impacto, se habrá solucionado en gran parte la polémica del agua en Aragón.

UNA JORNADA TÉCNICA NECESARIA

JOSÉ GONZÁLEZ BONILLO. *Director Gerente del CITA-DGA.*

LA CRISIS DEL SECTOR AGRARIO

El sector agrario está atravesando una época de crisis. La disminución de las ayudas de la Política Agraria Comunitaria (PAC), la liberalización de los mercados agrarios, su alta volatilidad, el incremento de los precios de la energía, o la creciente competencia por el agua son algunos de los factores que están transformando la actividad agraria. La agricultura está dejando de ser una actividad protegida para pasar a ser una actividad competitiva. Este hecho supone un enorme reto para el sector, pero también un tiempo de nuevas oportunidades.

ES TIEMPO DE OPORTUNIDADES

Toda crisis es compleja y conlleva dificultades, pues supone la transformación de una realidad cotidiana a la que estamos acostumbrados y en la que nos sentimos cómodos. Precisamente por ello es también un tiempo de cambio, de renovación, que nos brinda la oportunidad de superar nuestra situación anterior, de ser mejores y más competitivos. La correcta comprensión de las nuevas circunstancias y una adecuada y rápida adaptación a las mismas determinan el éxito en estas situaciones. El sector agrario está respondiendo a este tiempo de crisis buscando nuevas oportunidades a través de la mejora de sus estructuras productivas y de la modernización de sus regadíos.

LA IMPORTANCIA DEL CONOCIMIENTO

La inversión de capital en la mejora de las infraestructuras agrarias es necesaria. Sin embargo, no es suficiente. En una época en la que la globalización y la competencia son cada vez mayores, hay un factor esencial para lograr la viabilidad de cualquier actividad económica: el conocimiento y la innovación.

En la actualidad, y a diferencia de hace unos pocos años, los agricultores deben tomar decisiones considerando múltiples factores en un contexto de incertidumbre. Qué sembrar, cuándo y cuánto regar, o cuándo y cuánto fertilizar dependen ahora de cuestiones tan diversas como la incidencia de las sequías en otros países, el interés por las materias primas agrarias de los fondos de inversión internacionales, la evolución de de los precios mundiales del petróleo, o la cotización del dólar.

Asimismo, la sociedad exige la protección y conservación de los recursos naturales, siendo el agua y el suelo fundamentales para la vida. La agricultura de regadío debe compatibilizar su necesaria productivi-

dad económica con el respeto por el medio ambiente y, en particular, por el control adecuado de la contaminación difusa de sales y agroquímicos en los retornos de riego. Las exigencias impuestas por las actuales y futuras Directivas Europeas sobre la calidad de aguas y suelos son y serán un reto importante al que deberán enfrentarse nuestras Comunidades de Regantes.

LA I+D+I Y EL CITA

En estas circunstancias, la investigación, el desarrollo y la innovación, como generadores de nuevos conocimientos, debe incorporarse como un factor de producción más en la actividad de las empresas agrarias. Este ha sido el objetivo de la II Jornada Técnica de RAA donde investigadores del CITA y del CSIC han puesto en común con los asistentes a las mismas los últimos avances técnicos y medioambientales para una gestión eficiente del riego por aspersión.

Desde el CITA estamos trabajando en la generación de procesos y servicios que mejoren la competitividad, la rentabilidad y la viabilidad de vuestras explotaciones. Sabed que, como siempre, estamos a vuestro lado para afrontar las dificultades y retos que estos tiempos os plantean.

RIEGOS DEL ALTO ARAGÓN

Quiero aprovechar esta II Jornada Técnica para resaltar las excelentes y sostenidas relaciones entre el CITA, el CSIC y RAA. Relaciones totalmente necesarias para que los resultados que se generan en I+D+i se transmitan de forma rápida y efectiva a una Comunidad de Riegos tan importante como la vuestra, la mayor a nivel nacional y europeo. Como Director Gerente del CITA quiero apoyar y expresar mi satisfacción por esta colaboración que sin duda se prolongará y ampliará en el tiempo.

A lo largo de la historia, los regantes de Riegos del Alto Aragón han tenido que superar muchos retos y dificultades. Ahora, los descendientes de los que lucharon porque el agua llegase a estas tierras, hace ya casi un siglo, disfrutáis de los frutos de ese esfuerzo, de esa lucha, de ese cambio. Por eso, estoy convencido de que saldréis fortalecidos de estos tiempos de crisis, legando a vuestros hijos un Sistema de Riegos del Alto Aragón más fuerte, productivo y medioambientalmente más sostenible. Como muy bien decía Joaquín Costa, «el remedio del Alto Aragón no está en parte alguna, sino en la voluntad de sus gentes».

MODERNIZACIÓN DE REGADÍOS: VENTAJAS Y LIMITACIONES

SERGIO LECINA, DANIEL ISIDORO, ENRIQUE PLAYÁN, RAMÓN ARAGÜÉS. *Unidad de Suelos y Riegos (asociada a la EEAD-CSIC). Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA-DGA). Avda. Montañana 930. 50059 Zaragoza (España).* slecina@aragon.es; www.cita-aragon.es
Departamento de Suelo y Agua. Estación Experimental de Aula Dei (CSIC). Apdo. 13.034. 50080 Zaragoza (España) www.eead.csic.es

EL USO Y EL CONSUMO DE AGUA

En este artículo se analizan los efectos de la modernización de regadíos sobre el aprovechamiento del agua, su contaminación y la productividad de las explotaciones de Riegos del Alto Aragón (RAA). El objetivo es aportar información que resulte útil para tomar decisiones en la gestión de explotaciones y comunidades de regantes, y en la planificación de la zona regable.

Antes de abordar este estudio, vamos a revisar la diferencia entre el uso y el consumo de agua. Dos conceptos que con frecuencia se utilizan indistintamente, pero que tienen significados diferentes. Su distinción se basa en la capacidad que tiene el agua de ser reutilizada. Así, el uso hace referencia al volumen total de agua que se aplica para regar, y que es el que se factura. Sin embargo, el consumo únicamente se refiere a la parte del agua usada que no puede reutilizarse tras su aplicación en una parcela. Esta distinción es importante, puesto que permite conocer el volumen de agua que una zona regable realmente elimina de la cuenca, dejando por tanto de estar disponible para otros usuarios situados aguas abajo.

Para determinar qué parte del agua usada es consumida, es necesario fijarnos en el destino del agua de riego. En general, pueden distinguirse dos destinos principales:

1. La evapotranspiración: incluye la transpiración de las plantas y la evaporación directa. La evapotranspiración de los cultivos, al ser necesaria para producir las cosechas, se considera productiva, mientras que la de las malas hierbas, o la evaporación desde acequias y balsas resulta improductiva. En ambos casos, el agua se transforma en vapor que llega a la atmósfera, donde no se puede volver a utilizar en la cuenca. Por tanto, la evapotranspiración supone un consumo de agua.
2. La escorrentía y percolación: el agua usada que no es evapotranspirada en la parcela sale de la misma superficialmente por escorrentía, y percolando a través del suelo por debajo de la zona explorada por las raíces del cultivo. Dependiendo de la localización de la parcela en la cuenca, esta parte del agua usada puede retornar a ríos o acuíferos donde, si su calidad lo permite, puede volver a reutilizarse, no suponiendo por tanto un consumo de agua. Este es el caso de RAA. Si estos retornos se vierten directamente al mar, a lagos salados o a acuíferos no explotables, no podrán reutilizarse, por lo que en este caso la escorrentía y percolación sí que supondría un consumo de agua.

El volumen del agua usada en RAA se determina mediante la medición del caudal que se sirve diariamente a las comunidades para satisfacer sus peticiones. Sin embargo, su consumo es más difícil de calcular, puesto que para ello se requiere estudiar los destinos del agua de riego mediante balances de agua.

En este trabajo hemos estimado el consumo de agua de RAA, distinguiendo las comunidades que riegan por gravedad y las que riegan por aspersión. Para ello hemos utilizado datos de ADOR y de otras fuentes, así como los resultados de diversos trabajos de investigación realizados en RAA.

RIEGOS DEL ALTO ARAGÓN ANTES DE LA MODERNIZACIÓN

El estudio se realizó para las campañas 2003 y 2004, en las que no hubo restricciones de agua. El

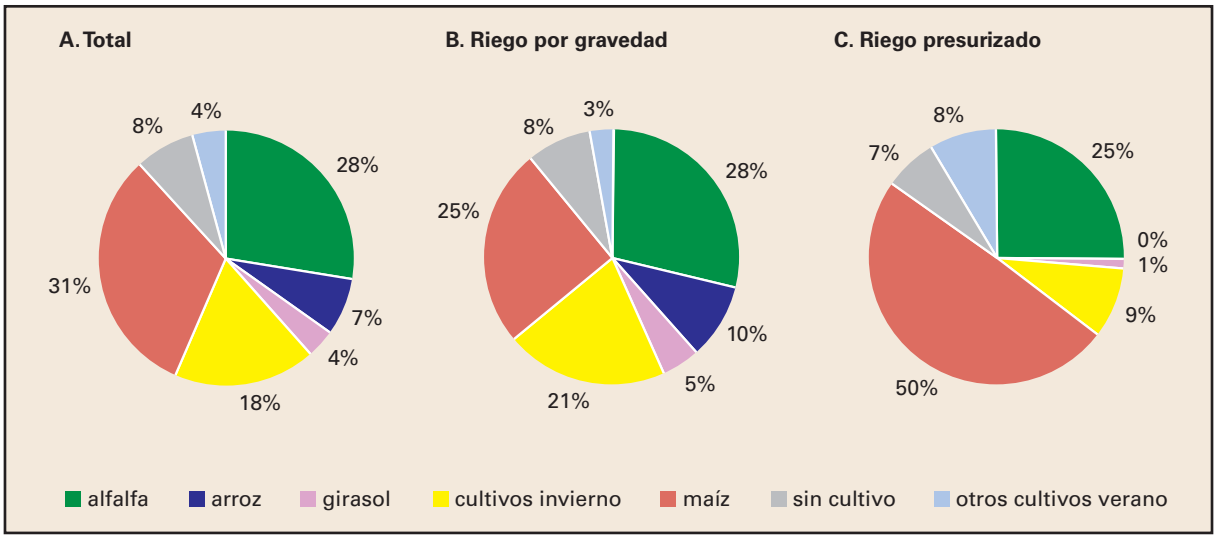

Figura 1. Patrón de cultivos por sistema de riego en la zona regable de Riegos del Alto Aragón. Promedio de las campañas 2003 y 2004.

patrón de cultivos se caracterizó por presentar las comunidades con riego por aspersión una mayor proporción de cultivos de verano, al tener sus redes presurizadas mayor capacidad de transporte de agua (Figura 1). En estas campañas todavía no se habían realizado modernizaciones que supusieran cambio de sistema de riego.

La Tabla 1 muestra el promedio de los resultados obtenidos, de los que cabe destacar lo siguiente:

- El agua usada (aplicada) en las comunidades con riego por aspersión (6.247 m^3/ha) fue un 8% superior respecto a las de riego por gravedad (5.762 m^3/ha). La razón fue la mayor superficie dedicada a maíz y alfalfa, con mayores necesidades de riego, y la reutilización parcial de los retornos de riego (escorrentía y percolación) en las comunidades con riego por gravedad.
- El consumo de agua fue un 48% superior en el riego por aspersión. La evapotranspiración productiva fue mayor en estas comunidades debido a la mayor superficie de cultivos de verano, y a la mayor frecuencia y uniformidad del riego por aspersión. La evapotranspiración no productiva también fue notablemente superior en aspersión, como consecuencia de la evaporación y arrastre parcial de las gotas de agua emitidas por los aspersores durante su trayecto hasta el cultivo y el suelo. Estas pérdidas pueden oscilar entre el 10 y el 20% del agua aplicada.
- El consumo productivo (evapotranspiración de los cultivos) respecto al consumo total fue mayor en riego por gravedad (95%) que en aspersión (83%), como consecuencia de las pérdidas por evaporación y arrastre. Para el conjunto de RAA, el agua consumida productivamente fue del 91%. Esta cifra indica que es escaso el margen para ahorrar agua sin reducir la producción agrícola en RAA, pues únicamente puede ahorrarse agua si se reduce su consumo.
- La escorrentía y percolación en parcela fue unas diez veces superior en el riego por gravedad que en el riego por aspersión, debido a la menor eficiencia de riego en parcela. La reutilización parcial de estos retornos en las propias comunidades de riego por gravedad redujo el volumen de retornos de riego que salieron de RAA. Dicho volumen fue un 24% del volumen total usado. Una pequeña parte de este volumen no pudo ser reaprovechado aguas abajo de RAA debido a que fue interceptado por lagunas saladas.
- La mayor escorrentía y percolación en las comunidades con riego por gravedad supuso una mayor exportación de contaminantes hacia los ríos. Estudios realizados en diversas zonas de RAA mostraron como en el riego por gravedad se perdían en torno a 89 kg de nitrato por hectárea a través de los retornos de riego, frente a una media de 31 kg en aspersión. Esta diferencia también supone un sobrecoste económico para las explotaciones. De forma similar, la contaminación salina de las aguas fue mayor en zonas de gravedad cuando en el subsuelo existían estratos ricos en sales.

Figura 2. Dos imágenes del río Flumen tomadas el 8 de septiembre de 2006. A la izquierda, en Lascasas, antes de llegar a Riegos del Alto Aragón. A la derecha, en Almuniente, tras adentrarse 18 km en Riegos del Alto Aragón.

- Finalmente, la productividad neta del suelo (descontados los costes) fue un 51% superior en las comunidades por aspersión (748 €/ha) respecto a las de gravedad (495 €/ha), debido a la mayor superficie de maíz y alfalfa, y a los mayores rendimientos obtenidos. Por el mismo motivo, la productividad neta del agua usada fue un 40% superior (0,120 €/m^3 frente a 0,086 €/m^3), lo que resulta de gran importancia para el regante en campañas con cupos de agua.

Estos resultados indican que la mayor productividad del riego por aspersión requiere un mayor consumo de agua, a pesar de que el agua se aplique de forma más eficiente en parcela. Las consecuencias que este hecho puede tener en RAA tras la modernización de su regadío se estiman a continuación.

RIEGOS DEL ALTO ARAGÓN TRAS LA MODERNIZACIÓN

En esta parte del trabajo se analizó cómo sería el balance de agua y la productividad si se considerase completado el proceso de cambio de sistema de riego en las 52.318 ha que se están modernizando. En estas comunidades se estimó un incremento del 16% de la superficie dedicada a cultivos de verano respecto al patrón de 2003-2004, debido a la mayor capacidad de sus redes presurizadas. Por el contrario, dichos cultivos se redujeron un 27% en las comunidades con riego por gravedad, debido a su pérdida de competitividad. Estos porcentajes se basan en las comunidades que en 2003-2004 presentaron los patrones más y menos intensificados, respectivamente. El resto de condiciones se consideraron idénticas a las de 2003-2004. Los resultados obtenidos para todo el sistema de RAA fueron los siguientes (Tabla 1):

- El consumo de agua se incrementó un 24% (130 hm^3) tras la modernización, debido al aumento de la evapotranspiración de los cultivos regados por aspersión, y a las pérdidas por evaporación y arrastre de este sistema de riego. Tras la modernización, la superficie regada por gravedad será minoritaria (36.000 ha).
- La escorrentía y percolación disminuyó un 32% (–59 hm^3) por la mejora de la eficiencia. Esta reducción debe suponer, además, una disminución de la exportación de contaminantes desde RAA. No obstante, puede significar una disminución importante del caudal en los cursos de agua cuyos caudales provienen mayoritariamente de los retornos del riego por gravedad durante el verano (Figura 2).
- El uso o demanda de agua se incrementó un 11% (79 hm^3), debido a que el aumento de la evapotranspiración fue superior a la disminución de la escorrentía y percolación.
- El valor neto de la producción agraria se incrementó un 28% (19 M€). La diferencia en productividad neta del suelo entre las comunidades que modernicen y las que no se estimó en torno a 350 €/ha (ya deducidos sus costes de operación). Este valor es similar a la amortización media anual de la inversión en modernización. Debe considerarse que estas productividades se corresponden con los precios de cultivos y factores de producción de 2003-2004. Las variaciones de los mismos influirán directamente en el patrón de cultivos y la productividad agraria en el futuro.

	Gravedad 2003-2004	Aspersión 2003-2004	RAA 2003-2004	RAA tras moderniz.
SUPERFICIE* (ha)	88.325	32.429	120.754	120.754
ENTRADAS** –agua usada– (hm^3)	509	203	711	790
SALIDAS** (hm^3)				
Evapotranspiración	**337**	**190**	**526**	**664**
Evapotranspiración productiva	332	157	489	578
Evapotranspiración no productiva	5	33	38	86
Escorrentía/Percolación	**172**	**13**	**185**	**126**
Escorrentía/Percolación no recuperable	13	0	13	5
Escorrentía/Percolación recuperable	160	13	172	121
INDICADORES HIDROLÓGICOS				
Volumen unitario usado (m^3/ha)	5,762	6,247	5,892	6,546
Volumen unitario consumido (m^3/ha)	3,953	5,860	4,465	5,544
Consumo sobre uso total (%)	69	94	76	85
Consumo productivo sobre consumo total (%)	95	83	91	86
INDICADORES ECONÓMICOS				
Valor neto de la producción (M€)	44	24	68	87
Productividad neta del suelo (€/ha)	495	748	563	719
Productividad neta del agua usada (€/m^3)	0,086	0,120	0,096	0,110

(*) No se ha incluido la superficie de viñedo regada por goteo ni el sector XXXVII del Canal del Cinca, todavía en transformación durante el periodo de estudio.
(**) Los valores están redondeados a números enteros.

Tabla 1. Balance de agua e indicadores hidrológicos y económicos de la zona regable de RAA. Promedio de las campañas 2003 y 2004.

CONCLUSIONES

- La modernización del regadío va a incrementar la productividad potencial de las explotaciones de RAA.
- Este incremento de productividad potencial supone un mayor consumo de agua, por lo que no se espera que la modernización de RAA ahorre agua.
- La mejora de la eficiencia de riego en parcela va a disminuir la contaminación agraria de las aguas, al reducirse el volumen de retornos de riego.
- La modernización de las infraestructuras es necesaria, aunque puede no ser suficiente para mejorar la rentabilidad de las explotaciones. Modernizar la gestión agronómica y del agua, así como la económico-financiera o la comercial también será necesario.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a la colaboración del personal de la Comunidad General de RAA y de sus Comunidades de Regantes, de las empresas Ager ingenieros S.L., Supraweb S.L., y Soster S.L., y de la Oficina del Regante que participaron en el proyecto de incorporación del sistema de gestión ADOR en RAA (2001-2005).

BIBLIOGRAFÍA

Lecina, S., Isidoro, D., Playán, E., Aragüés, R. 2009. *Efecto de la modernización de regadíos sobre la cantidad y la calidad de las aguas: la cuenca del Ebro como caso de estudio.* Monografía INIA n.º 26. Serie Agrícola. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Ministerio de Ciencia e Innovación. Madrid (España). 92 pp. Disponible en http://hdl.handle.net/10261/20127

Lecina, S., Isidoro, D., Playán, E., Aragüés, R. 2010. Irrigation Modernization and Water Conservation in Spain: The Case of Riegos del Alto Aragón. Agricultural Water Management, 97, 1663-1675. Disponible en http://hdl.handle.net/10261/27372 y http://hdl.handle.net/10532/1548

LA PROGRAMACIÓN DEL RIEGO POR ASPERSIÓN

JOSÉ MARÍA FACI GONZÁLEZ. *Unidad de Suelos y Riegos (Unidad Asociada EEAD-CSIC). Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA, DGA).*
Avda. Montañana 930, 50059 Zaragoza.
jfaci@aragon.es

En los últimos años la Comunidad General de Riegos del Alto Aragón ha realizado un importante esfuerzo inversor en la modernización y mejora de la gestión de sus regadíos. Muchas de sus comunidades de base han modernizado sus regadíos y sus gestores utilizan el modelo «Ador» para la gestión del riego. En gran parte de estos regadíos se han implantado sistemas automatizados de riego por aspersión que facilitan de forma muy considerable las labores del riego a los regantes y permiten una importante mejora del uso del agua de riego. Los regantes de estos regadíos modernizados y de los nuevos regadíos equipados con sistemas presurizados se enfrentan al nuevo reto de hacer un uso eficiente de los recursos de agua mediante la optimización de la programación del riego de acuerdo a las necesidades hídricas de los cultivos.

VENTAJAS Y LIMITACIONES DEL RIEGO POR ASPERSIÓN

El riego por aspersión comprende una variedad de sistemas de riego que se caracterizan porque el agua se aplica en el aire en forma de lluvia. Los principales sistemas que se instalan actualmente en los regadíos del Valle del Ebro incluyen las coberturas totales enterradas y los pivotes que son máquinas autodesplazables con un extremo fijo. En las coberturas se tiende a utilizar marcos triangulares de aspersión de 18 m por 18 m con aspersores de impacto equipados con boquilla principal de de 4 a 4,8 mm de diámetro y boquilla secundaria de unos 2,4 mm de diámetro. En los pivotes existe una tendencia a utilizar difusores de tipo rotatorio con baja presión de funcionamiento y a situar los difusores lo más próximo al suelo que sea posible con objeto de minimizar los costes energéticos y disminuir las pérdidas de evaporación y arrastre por el viento.

El objetivo que se busca en los sistemas de riego por aspersión es aplicar el agua de una forma homogénea a toda la superficie de la finca y de forma eficiente. La característica fundamental que deben cumplir los sistemas de riego por aspersión es que la pluviometría (L/m2 y hora) producida por los aspersores debe ser menor que la velocidad de infiltración del agua en el suelo de forma que el agua aplicada al terreno se infiltre donde ha caído y así se eviten los problemas de encharcamiento, escorrentía y erosión del suelo.

El riego por aspersión es un sistema de riego que bien diseñado y manejado produce altas uniformidades de distribución del agua y aceptables eficiencias de aplicación del riego siempre que el riego se efectúe en ausencia de viento. El riego por aspersión presenta una serie de ventajas que hace que los regadíos con estos sistemas de riego sean sostenibles en el futuro ya que están automatizados, apenas requieren mano de obra para su funcionamiento y permiten controlar perfectamente la dosis de riego aplicada. Sin embargo el riego por aspersión presenta dos limitaciones importantes que son: 1) la necesidad de energía para el funcionamiento del sistema y 2) el efecto negativo del viento en la calidad del riego por aspersión. En los últimos años el encarecimiento de combustibles y de la energía eléctrica ha hecho que las Comunidades de Regantes de riego por aspersión con equipos de bombeo estén prestando una atención especial a la optimización del uso de la energía con objeto de disminuir los costes energéticos todo lo que sea posible. En el cuadro 1 se presenta un resumen de las principales ventajas y limitaciones del riego por aspersión.

Riego por aspersión	
Ventajas	Limitaciones
No hace falta nivelar el terreno.	Requiere el uso de energía.
Se pueden regar terrenos ondulados.	Mayor coste energético de funcionamiento.
Existe un perfecto control sobre la dosis aplicada.	El viento afecta a la eficiencia y uniformidad del riego.
Se puede aumentar la frecuencia de riego con gran facilidad.	Se producen importantes pérdidas por evaporación y arrastre por el viento. En el Valle medio del Ebro hay vientos fuertes.
Se adapta muy bien al tamaño y forma de las fincas.	En algunos cultivos hay riesgo de enfermedades.
Es muy adecuado para el riego en las primeras fases del desarrollo de los cultivos.	Limitación del riego por aspersión con aguas salinas. Se producen quemaduras y descensos en el rendimiento.
Se puede automatizar.	En coberturas a marcos pequeños puede haber dificultades en la mecanización.
Permite el riego de suelos arenosos.	Se produce una dispersión de las partículas del suelo. Este problema está poco estudiado.
La mecanización de los cultivos es fácil.	
Los fertilizantes se pueden incorporar con el agua de riego mejorando su eficiencia.	

Cuadro 1. Principales ventajas y limitaciones del riego por aspersión.

LA PROGRAMACIÓN DEL RIEGO POR ASPERSIÓN DE LOS CULTIVOS

La programación del riego consiste en el establecimiento de las dosis e intervalos de los riegos adecuados para la producción óptima de los cultivos. Para poder establecer una programación de riegos es necesario que exista flexibilidad en el suministro de agua a las fincas. Cuando se dispone de un sistema de riego automatizado y riego a la demanda, el regante puede cambiar fácilmente la dosis y la frecuencia del riego por aspersión. A veces las Comunidades de Regantes establecen restricciones en el suministro de agua para evitar los problemas de caídas de presión en la red de distribución o para evitar elevadas tarifas de la energía eléctrica en determinadas horas del día. En general estas restricciones no presentan graves problemas y pueden coexistir con una buena programación de los riegos con una ligera intervención de los gestores de la Comunidad de Regantes.

El principio fundamental de una buena programación es que durante todo el ciclo del cultivo las necesidades hídricas del cultivo deben estar cubiertas por el riego y lluvia sin que se produzca déficit hídrico en el cultivo.

El primer requisito para hacer una buena programación del riego es conocer las necesidades hídricas de los cultivos. Una vez que se conocen estas necesidades hay que establecer un calendario de riegos de forma que las dosis aplicadas junto con la precipitación efectiva sean similares a las necesidades del cultivo a lo largo de todo su ciclo. La instalación en la parcela de sondas de humedad del suelo puede ayudar a la programación del riego pero la utilización de los cálculos de las necesidades hídricas como base de la programación es suficiente. Por otro lado es necesario que los riegos sean aplicados cuando las condiciones ambientales sean favorables para conseguir riegos eficientes y uniformes evitando pérdidas por escorrentía y por evaporación y arrastre por el viento. En este sentido es muy recomendable aplicar los riegos en ausencia de viento y durante la noche. Es bien conocido el hecho de que el viento es la variable meteorológica que tiene un mayor efecto en la calidad del riego por aspersión disminuyendo la uniformidad de su distribución y aumentando las pérdidas por evaporación y arrastre. Los estudios del viento en el Valle del Ebro han mostrado que el viento nocturno es muy inferior al viento diurno por lo que el riego por aspersión nocturno es muy recomendable. Además durante la noche la humedad relativa del aire es mayor que durante el día y la temperatura es menor y estas razones también refuerzan la recomendación del riego nocturno en los sistemas de aspersión.

No hay que olvidar que para conseguir una producción óptima hay que partir de un buen establecimiento del cultivo. En este sentido el riego por aspersión es un sistema muy interesante para evitar el problema de la formación de la costra de suelo en cultivos como el maíz mediante la aplicación de riegos muy frecuentes y ligeros en la fase de emergencia que mantiene húmeda la superficie del suelo y así se facilita la emergencia de las plántulas de maíz.

CÁLCULO DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS DE LOS CULTIVOS

En los últimos 30 años se han producido avances muy significativos en la determinación de las necesidades hídricas de los cultivos agrícolas. Estos avances permiten la determinación fiable de las necesidades hídricas de los cultivos. Normalmente se utiliza el procedimiento de la Organización Mundial de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) que consiste en determinar en primer lugar el efecto del clima que viene dado por la evapotranspiración de referencia (ETo). La ETo se define como el consumo de agua de una superficie de hierba sana, corta, bien fertilizada y bien regada. En la metodología de la FAO la ETo se determina principalmente por el método de Penman Monteith (Allen y col. 1998).

Después se determina el efecto del propio cultivo que viene dado por el coeficiente de cultivo (Kc). El Kc es un coeficiente que va aumentando conforme crece el cultivo hasta valores máximos cuando el cultivo alcanza la cobertura máxima del suelo y disminuye con la senescencia del mismo hasta su cosecha. La curva del Kc se obtiene dividiendo el ciclo del cultivo en 4 fases: 1) fase inicial que va desde la siembra hasta que el cultivo alcanza un 10% de suelo sombreado, 2) fase de desarrollo que va desde el final de la fase anterior hasta la cobertura efectiva máxima del cultivo (sobre un 70% de suelo sombreado), 3) fase de pleno crecimiento que comprende desde el final de la fase anterior hasta el comienzo de la senescencia de las hojas y 4) fase final que comprende desde el inicio de la senescencia de hojas hasta la madurez fisiológica o cosechado. La duración de estas cuatro fases de cultivo depende de las características de cada cultivo y variedad y de las condiciones locales (fecha de siembra y recolección, condiciones climáticas, etc.). Es muy conveniente que esta información sobre la duración de las fases del cultivo se recoja directamente en las zonas de cultivo. Los valores máximos de Kc se producen en la fase de pleno desarrollo y llegan a valores de 1 a 1,3 dependiendo fundamentalmente del porte y tipo de cultivo. El valor de Kc en la fase inicial depende fundamentalmente de la frecuencia de riegos y lluvias ya que la evaporación directa de agua del suelo es el componente más importante de la ETc en esta fase. Los valores de Kc en las fases inicial, de pleno desarrollo y final, bajo distintas condiciones climáticas, se obtienen de valores tabulados por la FAO para un gran número de cultivos (Doorenbos y Pruitt, 1977). Los valores de las necesidades hídricas del cultivo o lo que es lo mismo la evapotranspiración del cultivo (ETc) para los periodos de tiempo elegidos se determinan mediante la relación:

$$ETc = ETo \times Kc$$

A título ilustrativo las Figuras 1 y 2 presentan los valores medios mensuales de la ETo en Sariñena (Figura 1) y la construcción de la curva de Kc de un cultivo de maíz en Sariñena (Figura 2).

Una vez conocida la ETc el paso siguiente es determinar las necesidades de riego (R) para lo cual deberemos conocer la precipitación efectiva (PE), las necesidades de lavado del suelo (NL) y la eficiencia de aplicación (Ea) del sistema de riego empleado.

De una forma muy sencilla el regante interesado puede disponer de los datos de la ETo, ETc y necesidades de riego (R) de los cultivos en la página Web de la Oficina del Regante de Aragón (http://servicios.aragon.es/oresa/) y utilizar estos datos para hacer una óptima programación del riego de sus cultivos (Figura 3).

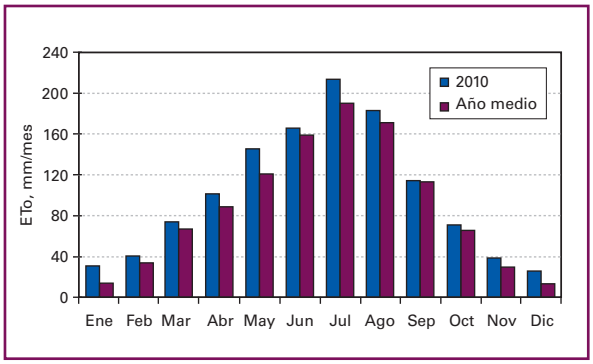

Figura 1. Valores medios mensuales de la evapotranspiración de referencia (ETo) en la estación meteorológica de Sariñena para el año 2010 y para el año medio (del 1 de agosto de 2003 al 31 de Diciembre de 2010).

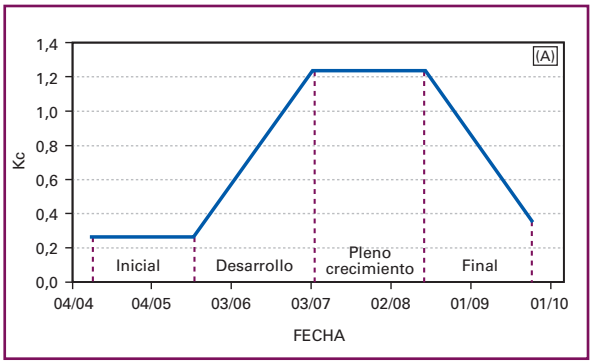

Figura 2. Construcción de la curva del coeficiente de cultivo (Kc) de maíz mediante la metodología de la FAO (Doorenbos y Pruitt, 1977) adaptado a las condiciones de cultivo en la zona de Sariñena (Huesca).

Figura 3. Página inicial del Portal Web de la Oficina del Regante de Aragón: http://servicios.aragon.es/oresa/

Figura 4. Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas automáticas de la red SIAR en Aragón (Mapa obtenido de la página Web de la Oficina del Regante de Aragón, http://servicios.aragon.es/oresa/).

La Oficina del Regante de Aragón, gestionada por SIRASA, suministra en su portal Web datos a tiempo real de las necesidades de riego semanales de los principales cultivos en 48 estaciones meteorológicas pertenecientes a la red de Información Agrometeorológica para el Regadío (red SIAR) instaladas en las principales zonas regables de Aragón (Figura 4). Asimismo el portal Web de la Oficina del Regante suministra los datos de distintas variables meteorológicas de interés agrícola, datos de la ETo y datos medios de las necesidades de riego de distintos cultivos en periodos mensuales, semanales y diarios en las distintas comarcas aragonesas.

DETERMINACIÓN DE LA PLUVIOMETRÍA MEDIA Y DEL TIEMPO DE RIEGO EN NUESTRO SISTEMA DE RIEGO POR ASPERSIÓN

La pluviometría de los sistemas de riego por aspersión depende fundamentalmente del marco de aspersión, del diámetro de la boquilla y de la presión de funcionamiento. Un aumento de la presión supone un aumento de la descarga y un mayor alcance. Cuando la presión en el aspersor es baja, el alcance del aspersor disminuye y se produce una distribución tipo rosquilla produciendo un descenso en la uniformidad del riego. Por ello es importante mantener la presión de funcionamiento por encima de los niveles mínimos permisibles.

Un sistema de aspersión funcionado a una presión produce una pluviometría determinada. En una cobertura de aspersión la pluviometría (L/m^2 y hora) se calcula dividiendo la descarga del aspersor (L/hora) por el marco de aspersión (m^2).

Un valor normal de la pluviometría de aspersión es de 5-7 L/m^2 y hora que equivalen a 5-7 mm/hora = 50-70 m^3/ha y hora. Estos datos vienen en los catálogos de las casas comerciales de los equipos de aspersión. El regante debe conocer perfectamente la pluviometría de su sistema de aspersión para programar la duración de los riegos. Dicha duración del riego (horas) se determina dividiendo la dosis de riego que queremos aplicar (L/m^2) por la pluviometría del sistema de riego (L/m^2 y hora).

Hay que tener en cuenta que cuando el riego se efectúa en condiciones de viento, se producen importantes pérdidas por evaporación y arrastre por el viento y solo una proporción del agua emitida por los aspersores llega al suelo debido a estas pérdidas operacionales del riego. Por ello la duración del riego deberá aumentarse para conseguir que la dosis requerida quede almacenada en el suelo. Resultados de evaluaciones del riego por aspersión muestran que incluso bajo condiciones ambientales óptimas, las pérdidas por evaporación y arrastre en riegos por aspersión diurnos pueden ser de un 10-15% del agua emitida por los aspersores.

En resumen, podemos concluir indicando que el riego por aspersión es un buen sistema de riego muy adecuado para los cultivos extensivos que se producen en el Valle del Ebro como el maíz, la alfalfa y el trigo. Sin embargo en el Valle del Ebro el riego por aspersión debe convivir con el cierzo que es un viento de fuerte intensidad con dirección predominante del Oeste-Noroeste. El viento es el gran enemigo del riego por aspersión ya que disminuye la uniformidad de aplicación del agua y aumenta las pérdidas por evaporación y arrastre. Por ello el viento debe ser tenido en cuenta tanto en el diseño de las instalaciones como en el propio manejo de los sistemas de aspersión evitando en lo posible el riego cuando existen vientos fuertes. Por esta razón el riego por aspersión nocturno es muy recomendable.

BIBLIOGRAFÍA

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Food and Agriculture Organization (FAO). Irrigation and Drainage. Paper 56. Rome, Italy.

Doorenbos J., Pruitt W. O. 1977. Crop water requirements, Food and Agriculture Organization (FAO). Irrigation and Drainage Paper 24, Revised, Rome, Italy. 194 pp.

FERTILIZACIÓN DEL MAÍZ EN RIEGO POR ASPERSIÓN

R. ISLA, D. QUÍLEZ. *Unidad de Suelos y Riegos (Unidad Asociada EEAD-CSIC). Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA-DGA). Avda. Montañana 930, 50059 Zaragoza (España).*
risla@aragon.es; www.cita-aragon.es
Teléfono: 976 71 63 95

INTRODUCCIÓN

La fertilización nitrogenada es uno de los elementos a tener en cuenta en las explotaciones agrarias desde el punto de vista tanto de su rentabilidad como de la protección del medio ambiente. Los cultivos responden al nitrógeno aumentando su rendimiento hasta una cierta cantidad de N, a partir de la cual el rendimiento se estabiliza o incluso puede disminuir. Es decir, la inversión en N no es rentable por encima de ese valor umbral. El nitrógeno que no es aprovechado por el cultivo se acumula en el suelo y puede provocar la contaminación de las aguas por nitrato. En este sentido la Directiva europea 91/676/CEE relativa a la protección de las aguas contra la contaminación por nitratos en la agricultura impone a los países miembros una serie de obligaciones que se han ido incorporando a las distintas CCAA en España. En Aragón, la Orden 11/12/2008 (BOA 02/01/09), establece hasta 13 zonas vulnerables en las que existe la obligatoriedad de cumplir el III Plan de Actuación (BOA 3/06/2009). Así, la optimización de la aplicación de fertilizantes, especialmente de los nitrogenados, a los cultivos se presenta como una necesidad para mejorar la rentabilidad de las explotaciones y como una obligación para cumplir las normativas en tema de calidad de aguas.

Esta comunicación abordará de forma específica algunas ideas generales para optimizar la aplicación de nitrógeno en el cultivo de maíz en sistemas de riego por aspersión, partiendo de información generada en ensayos realizados en el Valle Medio del Ebro por el grupo de investigación Riego, agronomía y medio ambiente (CITA-EEAD). El artículo se centra en dicho cultivo por ser uno de los más importantes en los regadíos de Aragón y por presentar unas elevadas necesidades de nitrógeno.

PROBLEMÁTICA DEL NITRÓGENO

El nitrógeno es el nutriente esencial que es requerido en mayores cantidades por el cultivo del maíz y que lo obtiene en forma de nitrato de la solución del suelo. Debido a que el nitrato es altamente soluble en agua y a que su disponibilidad en el suelo está asociada a procesos eminentemente microbiológicos, su concentración es muy variable en el tiempo para una misma parcela. Además el nitrato puede perderse del perfil del suelo por distintos procesos de lavado, escorrentía, desnitrificación y volatilización. Si bien en el caso de aplicaciones de estiércol o purín, la volatilización de amoniaco es la principal forma de pérdida, en el caso de los fertilizantes minerales son las perdidas por lavado de nitrato las que cuantitativamente son más importantes, tal como revelan los trabajos realizados en distintas cuencas de regadío en Aragón (Isidoro *et al.*, 2006).

NECESIDADES DE N DEL MAÍZ

Tal como se observa en la Figura 1, las extracciones de N en el cultivo de maíz aumentan de forma lineal con la producción. En promedio, por cada tonelada de grano (14% humedad) se extraen unos 12 kg de N con el grano y unos 6 kg en el resto de la planta. A dicha cantidad habría que añadir unos 2-3 kg/t grano que pueden quedar en las raíces según indican algunos trabajos. En conjunto unos 21 kg de N por cada tonelada de maíz grano que se produce.

Las extracciones del maíz no se producen de forma lineal a lo largo de su ciclo, sino que en fases iniciales, hasta un estado de 6 hojas las extracciones son muy bajas. A partir de entonces aumentan de forma exponencial hasta la floración o unos días más tarde. A partir del estado R2 (10-14 días después de aparición de penachos) la absorción de N disminuye.

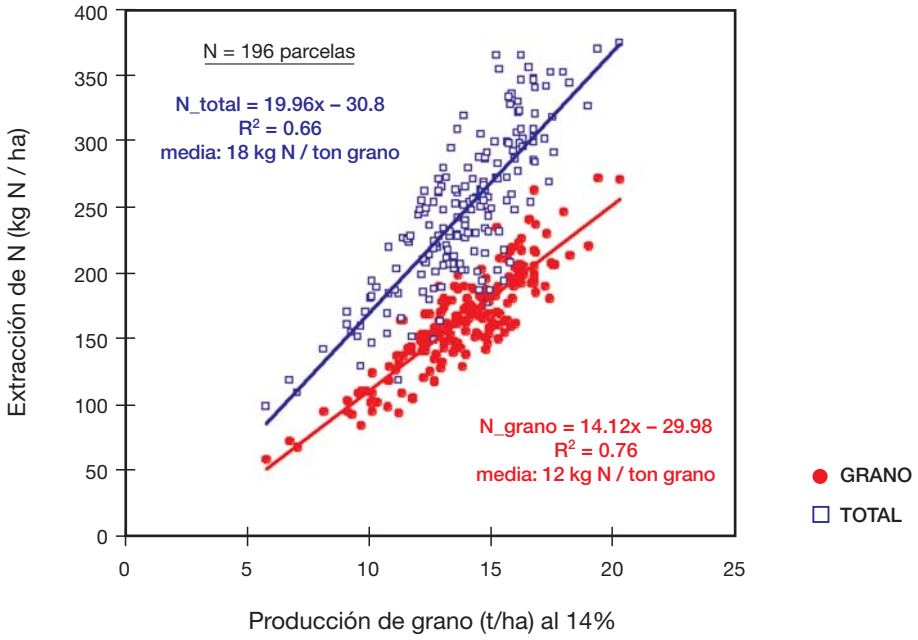

Figura 1. Relación entre las extracciones de N por el cultivo de maíz y la producción de grano en sistemas de regadío de Aragón.

VENTAJAS ESPECÍFICAS DEL RIEGO POR ASPERSIÓN

Dado que la mayor parte de las pérdidas de N en los sistemas de regadío se producen por lavado, la mejora de la eficiencia del riego asociada al cambio a sistemas de aspersión provoca una mejora en la eficiencia del N aplicado (Saad, 1999), disminuyendo estas pérdidas. Una ventaja adicional del riego por aspersión es que es posible aplicar el fertilizante con el agua de riego en fases avanzadas del cultivo, permitiendo un mejor fraccionamiento de las coberteras en el maíz y ajustando las aplicaciones a los momentos de mayor absorción de N. La aplicación de N mediante fertirriego implica la inyección mediante bombas hidráulicas o eléctricas a la red de riego (Figura 2). Las primeras no precisan electricidad, son portátiles y de bajo coste, pero el control de la dosis es más difícil y sufren un mayor desgaste. Por el contrario las bombas eléctricas suponen un mayor coste, pero la dosis es más fácil de controlar ya que no depende de la presión de la red de riego.

RECOMENDACIONES GENERALES

Asumiendo un manejo del riego eficiente, se pueden indicar las siguientes recomendaciones generales para aplicar fertilizantes N al maíz de una forma razonable evitando su despilfarro y la contaminación de las aguas:

Figura 2. Instalación de riego con bomba de inyección eléctrica y detalle de la misma con el regulador de caudal a inyectar.

1. Tener en cuenta las aplicaciones de fertilizantes orgánicos realizados en la parcela como purín porcino u otros, ya que contienen cantidades apreciables de nutrientes (Iguacel-Soteras, 2006). Al hacer el balance de las necesidades de nuestro cultivo es preciso descontar parte del N aplicado con dichas aplicaciones. En el caso del purín porcino, muy utilizado en los regadíos del Valle del Ebro, un 60-70% del nitrógeno puede estar disponible el primer año de la aplicación.

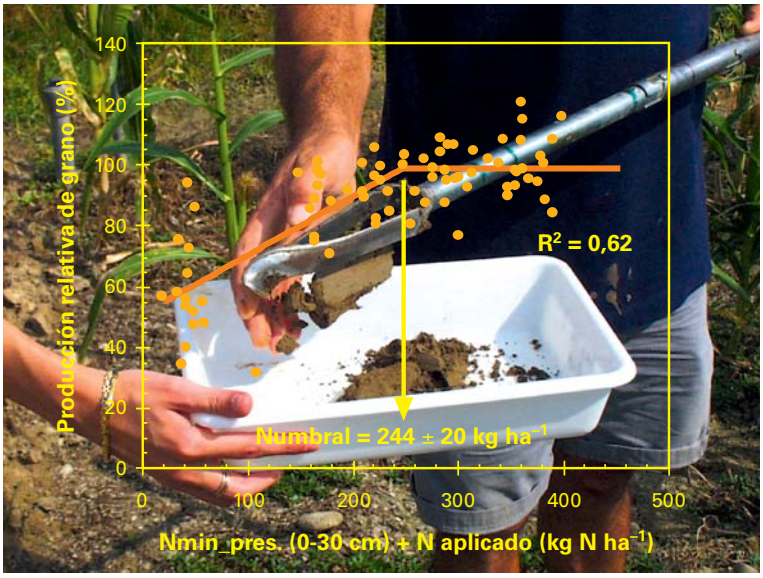

Figura 3. Relación entre la producción de maíz (relativa al máximo, %) y la disponibilidad de N durante el cultivo (kg N/ha). Resultados obtenidos bajo riego por aspersión y suelos profundos (extraído de Isla et al., 2006).

2. Si se aplica purín en fondo al maíz, las dosis no deben superar los 30 m^3/ha de purín de cebo (Yagüe y Quilez, 2010). Con esta dosis se cubren además las necesidades de fósforo y potasio del maíz y se añaden microelementos.
3. Evitar aplicar grandes cantidades de N mineral al maíz en presiembra, pudiendo ser suficiente con 50 kg N/ha, siempre que se haga una primera cobertera en el estado de 6 hojas (V6).
4. Reducir de forma sustancial la cantidad de N cuando el maíz se cultiva después de alfalfa. Recientes trabajos realizados en los regadíos del Valle del Ebro en suelos profundos (Cela *et al.*, 2011) indican que son suficientes entre cero y 196 kg N/ha para llegar al máximo de producción en maíz tras alfalfa. En sistemas de riego por aspersión este intervalo es mas bajo, entre cero y 115 kg N/ha, mostrando la posibilidad de una gran reducción de las dosis de N a aplicar después de alfalfa.
5. No aplicar dosis totales superiores a 250 kg N/ha.
6. Dado que las necesidades de N varían cada año para una parcela determinada, para un buen ajuste es necesario utilizar alguna *herramienta de ajuste* basada bien en el nitrógeno disponible en el suelo o en el estado nutricional del maíz durante el cultivo.

UTILIZACIÓN DE HERRAMIENTAS DE AJUSTE

Un análisis de la concentración de nitrato de la capa superficial (0-30 cm) proporciona una idea estática pero válida del N mineral disponible antes de la siembra. Conocidas las extracciones previstas (Figura 1), y asumiendo un buen manejo del riego aplicando las dosis en función de las necesidades hídricas reales, el contenido de N al inicio del cultivo puede ayudar a indicar la cantidad adicional de N que es necesario aplicar en la fertilización. La Figura 3 muestra una relación empírica obtenida bajo sistemas de riego por aspersión en la que se muestra que a partir de un valor umbral de unos 250 kg N/ha el rendimiento es el máximo. Dado que el suelo tiene una capacidad de mineralización variable en función de su contenido de materia orgánica, y que parte del N que se aplica puede ser utilizado por microorganismos para descomponer residuos vegetales recientemente aplicados, no es fácil obtener la dosis óptima de una manera exacta. Así, el valor umbral de la Figura 3 no es completamente extrapolable a todos los suelos que existen en Aragón, pero si la relación existente entre ambas variables.

Dado que el cultivo de maíz responde de forma relativamente rápida a la falta de nitrógeno (Figura 4), una alternativa a los análisis del suelo es emplear equipos que miden de forma indirecta la cantidad de clorofila de las hojas (SPAD® 502, Figura 5). La forma recomendada por la bibliografía para utilizar dichos equipos consiste en lo siguiente:

- –Disponer de bandas sobrefertilizadas, esto es establecer una pequeña zona de la parcela con una dosis de N claramente por encima de las necesidades. Esta sobrefertilización puede hacerse en presiembra en una zona «representativa» de la parcela.
- –Aplicar unas dosis de N bajas antes de la siembra y conservadoras en la primera cobertera (estado de 6 hojas, maíz con 50 cm de altura).
- –Cuando el maíz está con unas 15-16 hojas desarrolladas (altura al hombro, aproximadamente),

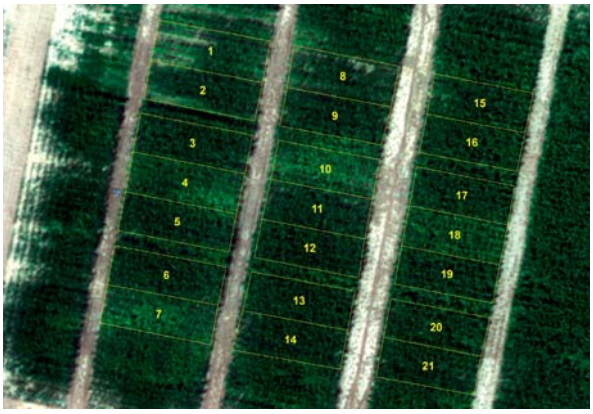

Figura 4. Imagen aérea de un ensayo de maíz en la finca del CITA, antes de floración. Se observa claramente la diferencia entre las parcelas deficitarias en N (parcelas nos 1, 4, 7 ,10 y 18), frente a la parcela sobrefertilizada (nº 11).

Figura 5. Fotografía del equipo medidor de clorofila SPAD®, mostrando su modo de uso.

se hacen medidas con dicho equipo en la hoja de la mazorca principal. Las medidas se realizan en la zona sobrefertilizada y en el resto de la parcela, midiendo en al menos 30 plantas en cada área. Si la lectura media de la parcela es superior al 95% del valor obtenido en la parcela sobrefertilizada, no se aplica más nitrógeno. Si por el contrario el valor es inferior al 95%, debe aplicarse una cantidad adicional de N, que no debería ser superior a unos 100 kg N/ha, debido a que una parte importante de los requerimientos ya han sido cubiertos.

Hay que señalar que si bien la medida con equipos de clorofila es más sencilla y supone menos esfuerzo que tomar una muestra representativa del suelo también presenta el inconveniente de no proporcionar por si misma cuanto N hay que aplicar a las parcelas consideradas deficitarias. Asimismo, si inicialmente los niveles de N mineral del suelo son bajos, no se debería esperar a fases avanzadas para realizar las lecturas, ya que el daño de deficiencias severas sobre la producción final no es recuperable aunque se hagan aportaciones importantes de N posteriormente.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

Cela, S., Salmerón, M., Cavero, J., Isla, R., Santiveri, F., Lloveras, J. 2011. *Reduced nitrogen fertilization to corn following alfalfa in an irrigated semiarid environment.* Agron. J. 103(2): 520-528.

Iguacel-Soteras, F. 2006. *Estiércoles y fertilización nitrogenada.* En: «Fertilización nitrogenada, Guía de actualización». Pag. 53-62 (cap. 4). Información Técnica, número extraordinario. Departamento de Agricultura, Gobierno de Aragón.

Isidoro, D., Quilez, D., and Aragues, R. 2006. *Environmental impact of irrigation in La Violada District (Spain): II. Nitrogen fertilization and nitrate export patterns in drainage water.* Journal of Environmental Quality 35:776-785.

Isla, R., Cavero, J., Yagüe, MR., Quílez, D. 2006. *Balances de nitrógeno en cultivo de maíz de regadío en Aragón.* En «Balance de nitrógeno en sistemas de cultivo de cereal de invierno y de maíz en varias regiones españolas». Pag. 107-124, cap. VIII. Monografía INIA, Nº 22. Ministerio de Educación y Ciencia, Madrid.

Saad, J. 1999. *Efecto de la dosis de abonado y el riego sobre el lavado de nitrato en cultivo de maíz.* Tesis doctoral Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria. Universidad de Lleida.

Yagüe, M.R., D. Quílez. 2010. *Assessment of nitrate leaching in irrigated maize fertilized with pig slurry combined with mineral nitrogen.* Journal of Environmental Quality 39:686-696.

CALIDAD DEL AGUA PARA EL RIEGO: EFECTOS SOBRE PLANTAS Y SUELOS

R. ARAGÜÉS. *Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA-DGA), Unidad de Suelos y Riegos (Unidad Asociada EEAD-CSIC).*
raragues@aragon.es
Avda de Montañana 930, 50059 Zaragoza (España).
www.cita-aragon.es

INTRODUCCIÓN

La calidad del agua es una variable fundamental del riego, ya que afecta tanto a las plantas como a los suelos. En este artículo (1) se resumen las variables principales que definen la calidad de un agua para el riego, (2) se recomiendan algunas prácticas de manejo que minimizan los problemas de calidad del agua, y (3) se define la calidad de las aguas superficiales de la cuenca del Ebro en base a dos variables fundamentales: la salinidad y la sodicidad.

VARIABLES QUE DEFINEN LA CALIDAD DEL AGUA PARA EL RIEGO

La Tabla 1 resume las variables principales que deben evaluarse y los parámetros correspondientes a medir para establecer la aptitud de calidad de las aguas para el riego.

EFECTOS SOBRE LAS PLANTAS

La salinidad (# 1 en Tabla 1) es la variable de calidad que tiene un mayor efecto sobre las plantas. En base al parámetro de medida CE, la FAO establece que aguas con una CE < 0.7 dS/m no tienen ningún grado de restricción de uso para riego, aguas con una CE > 0.7 dS/m y < 3.0 dS/m tienen un grado de restricción entre ligero y moderado, y aguas con una CE > 3.0 dS/m tienen un grado de restricción severo.

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que esta clasificación general se ve muy afectada por otras variables indicadas en la Tabla 1, tales como (a) las concentraciones de sodio (Na^+) y cloruro (Cl^-) en el agua de riego, (b) la tolerancia de los cultivos a la salinidad, (c) el sistema de riego y (d) la fracción de lavado.

(a) Las concentraciones de Na^+ y Cl^- (# 4, Tabla 1) son muy negativas para los cultivos sensibles a toxicidad iónica específica, sobre todo en riego por aspersión debido a la absorción directa de estos iones a través de las hojas mojadas por el agua de riego. La Tabla 2 presenta las concentraciones de estos iones que producen daño foliar en distintos cultivos. Valores inferiores a 5 meq/L pueden

#	Variable	Parámetro de medida
1	Salinidad	Conductividad Eléctrica (CE, dS/m)
2	Sodicidad	Relación de Adsorción de Sodio [RAS, $mmol/L)^{0.5}$]
3	Alcalinidad	pH
4	Toxicidad iónica específica	Concentraciones de Sodio (Na^+) y Cloruro (Cl^-) (meq/L)
5	Tolerancia de los cultivos a la salinidad	CE-umbral, Pendiente
6	Tolerancia de los suelos al efecto combinado de la salinidad, sodicidad y alcalinidad	CE, RAS y pH
7	Riego	Sistema de riego, Fracción de lavado (FL)

Tabla 1. Variables y parámetros de medida que definen la calidad del agua para el riego.

< 5 meq/L	5 - 10 meq/L	10 - 20 meq/L	> 20 meq/L
Almendro	Viña	Alfalfa	Coliflor
Albaricoquero	Pimiento	Cebada	Algodón
Cítricos	Patata	Maíz	Remolacha
Ciruelo	Tomate	Sorgo	Girasol
El grado de daño foliar depende también de las condiciones atmosféricas, tamaño de las gotas de agua, estado de desarrollo del cultivo y de ciertas prácticas de manejo del riego.			

Tabla 2. Concentración de sodio o cloruro en el agua de riego por aspersión que produce daño foliar debido a toxicidad iónica específica.

ser perjudiciales para los cultivos más sensibles (la mayoría de los frutales), mientras que otros cultivos tolerantes no se ven afectados por concentraciones de 20 meq/L. Esta Tabla señala además que el grado de daño foliar depende también de otras variables, en particular de las condiciones atmosféricas como la temperatura, la insolación y la humedad relativa.

(b) La tolerancia de los cultivos a la salinidad (# 5, Tabla 1) determina asimismo la aptitud de un agua para el riego, ya que conforme más tolerante es el cultivo pueden utilizarse aguas más salinas sin mermas de producción. La tolerancia a la salinidad se cuantifica por la CE-umbral (salinidad por encima de la cual el cultivo desciende en rendimiento) y la pendiente (porcentaje de descenso lineal del rendimiento del cultivo por incremento unidad de la salinidad). La Tabla 3 clasifica dicha tolerancia para los cultivos más importantes de la cuenca del Ebro. En general, los cereales de invierno son los cultivos mas tolerantes, y los frutales y hortícolas los más sensibles a salinidad.

(c) El sistema de riego (# 7, Tabla 1) debe asimismo tenerse en cuenta, ya que los problemas potenciales de salinidad dependen del mismo. La Tabla 4 resume los problemas potenciales de salinidad del agua de riego para los sistemas de riego más importantes, así como algunas prácticas de manejo o medidas correctoras de estos problemas.

En términos generales, si el agua de riego es salina el sistema menos recomendado es el de riego por aspersión debido a la absorción iónica foliar, y el más recomendado es el de riego por goteo superficial de alta frecuencia debido a que en las proximidades de los goteros (zona de extracción preferente del agua del suelo por los cultivos), la fracción de lavado es muy alta y la salinidad del suelo es similar a la del agua de riego.

(d) La fracción de lavado (FL) (# 7, Tabla 1), definida como la fracción del agua infiltrada en el suelo que percola por debajo de la zona de raíces de los cultivos, es una variable crítica ya que determina la salinidad que resulta en el suelo para una salinidad dada del agua de riego.

La Figura 1 presenta para sistemas de riego convencional (inundación y aspersión) la relación entre la salinidad del agua de riego, la FL y la salinidad resultante en el suelo expresada como CE del extracto saturado (CEe) media de la zona de raíces. Por ejemplo, para una CE del agua de riego de 2 dS/m, la CEe resultante es de 1.5 dS/m si la FL es muy alta (0.5), 2.5 dS/m si la FL es moderada (0.2) y hasta casi 6 dS/m si la FL es muy baja (0.05). Es decir, conforme mayor es la FL, menor es la salinidad resultante en el suelo, por lo que pueden utilizarse cultivos más sensibles a salinidad o, para un cultivo determinado, pueden utilizarse aguas más salinas sin mermas de producción.

Alfalfa-MS (2.0)	Espárrago-T (4.1)	Girasol-MT (7.1)	Olivo-MT (4.0)	Tomate-MS (2.5)
Arroz-MS (3.0)	Festuca-MT (3.9)	Hortícolas-S (1.5)	Soja-MT (5.0)	Trigo-MT (6.0)
Cebada-T (8.0)	Frutales-S (1.5)	Maiz-MS (1.7)	Sorgo-MT (6.8)	Viña-S (1.5)

Tabla 3. Tolerancia a la salinidad de los cultivos principales de la cuenca del Ebro ordenados alfabéticamente: tolerante-T, moderadamente tolerante-MT, moderadamente sensible-MS y sensible-S. En paréntesis se presenta la CEe-umbral (CE del extracto saturado del suelo en dS/m).

Sistema de riego	Problema potencial	Medidas correctoras
Inundación	Baja uniformidad en la distribución del agua ==> lavado diferencial de sales	Nivelación por láser; evitar encharcamientos prolongados; incrementar la frecuencia del riego (con dosis menores en cada riego)
Surcos	Evaporación del agua y acumulación de sales en la parte superior de los caballones	Acolchado del caballón; reformado del caballón; sembrar a los lados del caballón; riego en surcos alternantes
Aspersión	Mojado de las hojas y absorción iónica foliar ==> toxicidad iónica específica	Evitar el mojado de las hojas; regar por la noche; reducir la frecuencia y aumentar los tiempos de riego; aplicar post-riegos con agua dulce si está disponible
Goteo	Acumulación de sales en los bordes del bulbo húmedo; obturación de goteros Goteo subterráneo: acumulación de sales entre la superficie del suelo y las líneas de goteo	Aumentar la densidad de goteros; conectar el riego si llueve (evitar la entrada de sales en la zona de raíces); acidificar el agua Goteo subterráneo: lavar las sales acumuladas en superficie regando por inundación o aspersión

Tabla 4. Salinidad y sistemas de riego: síntesis de problemas potenciales y medidas correctoras.

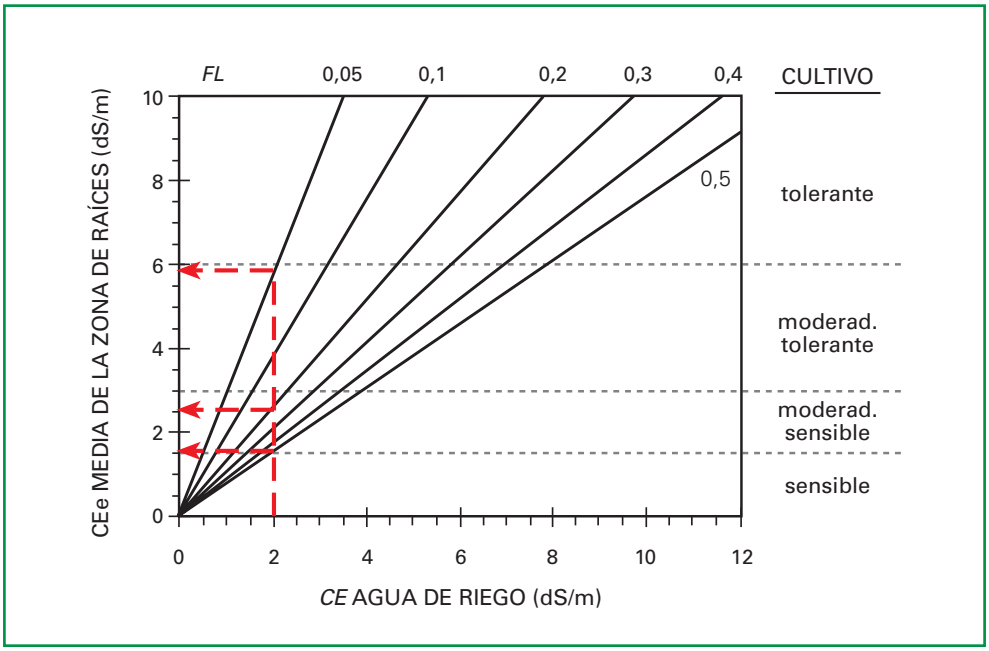

Figura 1. Relación entre la salinidad (CE) del agua de riego, la fracción de lavado (FL) y la salinidad resultante en el suelo (CEe media de la zona de raíces). Como un ejemplo, las líneas rojas presentan la CEe resultante en el suelo para una CE del agua de riego de 2 dS/m y tres FL (0.5, 0.2 y 0.05).

Para sistemas de riego de alta frecuencia (goteo), se considera que la CEe resultante de una determinada combinación de FL y CE del agua de riego es entre un 10 y un 30% menor que la que resulta en riego convencional. Esta es una de las razones por las que se recomienda el riego por goteo en vez del convencional si las aguas de riego son salinas.

Trabajos recientes sugieren asimismo que las clasificaciones clásicas de calidad de las aguas para el riego son conservadores, de tal manera que sería posible regar con aguas mas salinas de lo que se aceptaba anteriormente, sobre todo en zonas donde las lluvias pueden lavar las sales acumuladas en el suelo.

EFECTOS SOBRE LOS SUELOS

La sodicidad (# 2, Tabla 1) es la variable más negativa para los suelos, seguida de la alcalinidad (# 3). Ello es debido a que valores elevados de RAS (sodicidad) y pH (alcalinidad) conducen a la pérdida de estabilidad estructural de los suelos que se produce fundamentalmente por la dispersión y/o hinchamiento de las arcillas sensibles a estos procesos. Esta pérdida de estabilidad de los suelos reduce su capacidad para transmitir agua (descensos de la conductividad hidráulica y/o infiltración). Por el contrario, la salinidad tiene un efecto beneficioso sobre la estructura de los suelos, ya que reduce los procesos de dispersión y/o hinchamiento de arcillas. Por ello, el efecto de la calidad del agua de riego sobre la estabilidad estructural de los suelos debe evaluarse teniendo en cuenta el resultado combinado de los efectos beneficioso de la salinidad (CE) y perjudicial de la sodicidad (RAS).

La Figura 2 presenta la combinación de valores de CE y RAS para la que un suelo es estable (área por encima de la curva roja) e inestable (área por debajo de la curva roja). Esta Figura indica que (a) para una CE determinada, un suelo es tanto más estable cuanto menor es la RAS, y que (b) para una RAS determinada, un suelo es tanto mas estable conforme mayor es la CE. De esta Figura se deduce que aguas de muy baja CE (inferiores a unos 0.3 dS/m) pueden desestabilizar los suelos para cualquier valor de RAS. Así, las aguas de lluvia, con valores muy bajos de CE y RAS, pueden producir la pérdida de estabilidad de los suelos, sobre todo en superficie, produciendo su encostrado («encarado») y los correspondientes efectos negativos sobre la infiltración y sobre la germinación y emergencia de las plántulas.

Este diagrama de estabilidad estructural es diferente para cada suelo, ya que depende de sus características físico-químicas y, en particular, de la textura, el contenido de materia orgánica, el pH y el tipo de arcillas presentes en el mismo. Por ello, el efecto de la calidad del agua debe evaluarse mediante ensayos de campo específicos para cada suelo en particular. A pesar de esta especificidad, puede generalizarse cuándo son más relevantes estos efectos (Tabla 5). La situación más negativa para los suelos sería la aplicación de aguas dulces, alcalinas y sódicas en sistemas de riego por aspersión de elevada intensidad (gotas de elevado tamaño y energía cinética). Sin embargo, una ventaja del riego por aspersión en relación con el riego por inundación es que pueden reblandecerse los suelos encostrados aumentando la frecuencia del riego con dosis mínimas de aplicación de agua. En la Tabla 5 se resumen ésta y otras opciones de manejo para reducir los efectos negativos sobre los suelos.

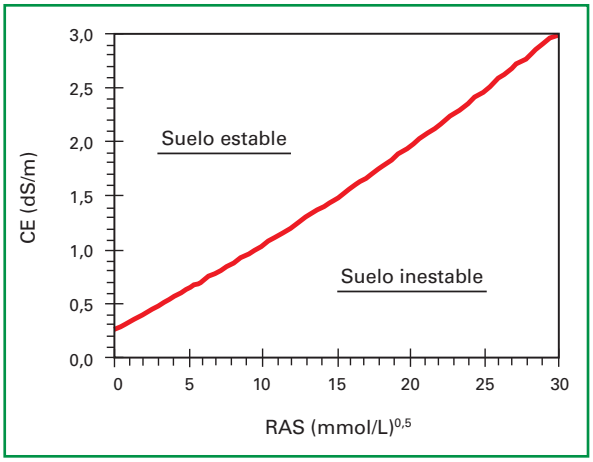

Figura 2. Diagrama de estabilidad de los suelos: la combinación de CE y RAS del agua de riego que cae por encima de la curva produce suelos estables. La combinación que cae por debajo de la curva produce suelos inestables.

La pérdida de estabilidad estructural de los suelos es relevante para:	
1. Aguas de baja salinidad (CE)	4. Riegos con pluviometría de elevada intensidad
2. Aguas de alta sodicidad (RAS)	5. Suelos con baja materia orgánica (MO)
3. Aguas de alta alcalinidad (pH)	6. Suelos con elevado limo y arcillas inestables
Opciones de manejo para reducir los efectos negativos:	
1. Aplicación de enmiendas químicas (yeso, polímeros, etc.)	3. Adición de residuos de cultivos (aumento de la MO), mínimo laboreo
2. Cambiar a sistemas de riego con baja intensidad pluviométrica	4. Acolchado del suelo
3. Aumentar la frecuencia del riego para reblandecer los suelos encostrados	5. Uso de cultivos con cubierta permanente y/o temprana

Tabla 5. Efectos de la calidad del agua sobre los suelos: ¿Cuándo son relevantes? ¿Qué opciones de manejo existen para reducir los efectos negativos?

CALIDAD DE LAS AGUAS SUPERFICIALES DE LA CUENCA DEL EBRO

La salinidad (CE, dS/m) y sodicidad [RAS, $(mmol/L)^{0.5}$] media de las aguas superficiales de la cuenca del Ebro se ha determinado en base a los datos de 80 estaciones de calidad de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) de los años 1988, 89 y 90. La combinación de los valores de CE y RAS de cada estación se ha representado sobre el diagrama de estabilidad estructural (infiltración) de los suelos (Figura 3). En esta Figura, el riego con aguas situadas a la izquierda de la línea roja produciría en el suelo descensos serios de infiltración, las situadas entre las líneas roja y marrón producirían descensos de infiltración entre moderados (las más próximas a la línea roja) y bajos (las más próximas a la línea marrón) y las situadas a la derecha de la línea marrón no producirían descensos de infiltración. Esta clasificación es aproximada y sujeta a revisión, puesto que se ha señalado anteriormente que depende también de las características físico-químicas de los suelos.

Asimismo, en esta Figura se han establecido dos zonas de CE en base a la respuesta de los cultivos a la salinidad: independientemente de la RAS, las aguas situadas en la zona entre 0 y 0,7 dS/m no tendrían restricciones de uso, mientras que las situadas a la derecha de 0.7 dS/m sufrirían descensos de rendimiento que serían tanto mayores conforme mayor sea la CE. Esta clasificación es aproximada y sujeta a revisión, puesto que se ha señalado anteriormente que depende también de otras variables (Tabla 1) y, en particular, de la tolerancia del cultivo y de la fracción de lavado impuesta con el riego.

Las aguas representadas en la Figura 3 se han caracterizado con distintos símbolos para distinguir aquellas que no se utilizan generalmente para el riego de las que se utilizan para los regadíos situados en el eje del río Ebro y en sus márgenes derecha e izquierda. Las aguas de la margen izquierda que riegan casi el 70% del regadío total en la cuenca del Ebro, son de excelente calidad para los cultivos ya que tienen una CE muy baja (inferior a 0.4 dS/m) por provenir en su mayoría de los Pirineos (área en verde claro de la Figura 4). Sin embargo, a pesar de su baja sodicidad estas aguas pueden producir descensos moderados de infiltración (Figura 3) debido a su baja salinidad.

Por el contrario, la mayoría de las aguas de los regadíos del tramo medio e inferior de la margen derecha del Ebro y del propio Ebro tienen una CE próxima o superior a 1 dS/m (Figura 4) y una sodicidad baja, por lo que no producen en general pérdidas de infiltración, pero pueden afectar negativamente al rendimiento de los cultivos sensibles a salinidad, sobre todo si se riegan con bajas FL y en zonas con

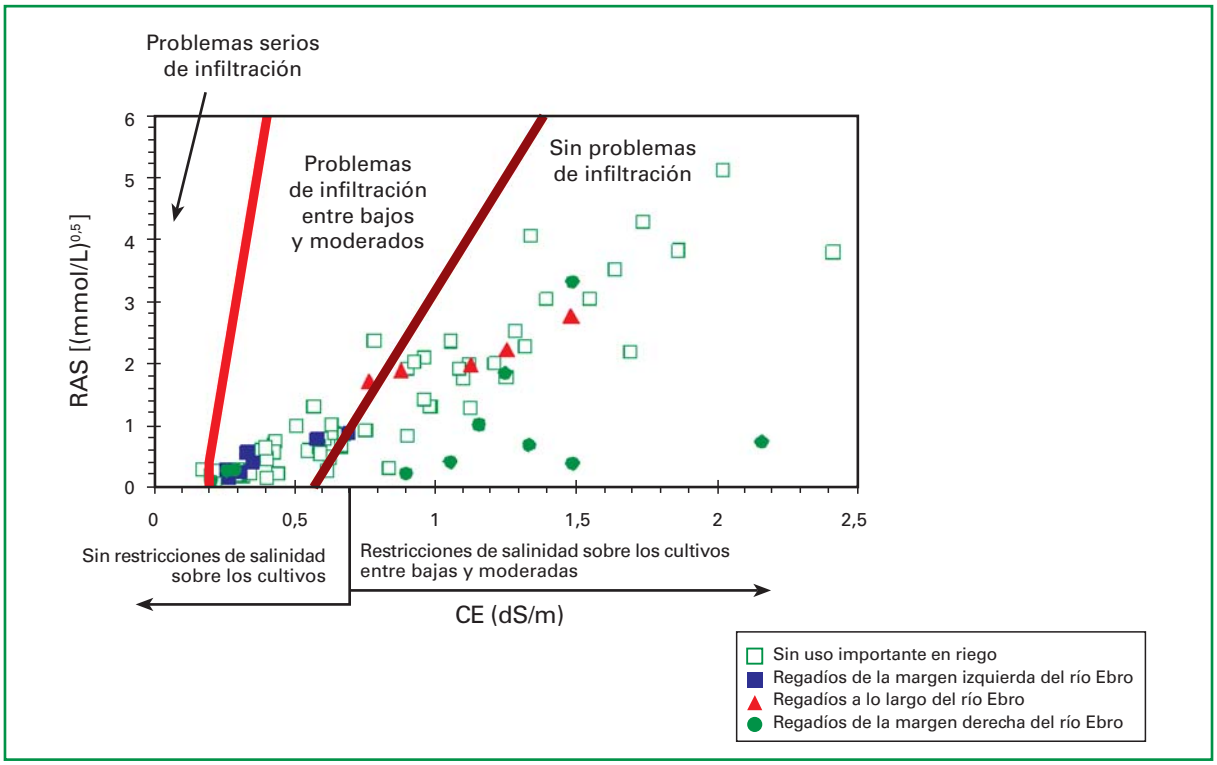

Figura 3. Valores medios de salinidad (CE) y sodicidad (RAS) de 80 estaciones de calidad de aguas de la cuenca del Ebro (CHE) representados sobre el diagrama de estabilidad estructural (infiltración) de los suelos.

baja precipitación. Así, los regadíos del PEBEA (Plan Estratégico del Bajo Ebro Aragonés, zona climática con precipitaciones anuales inferiores a 350 mm) utilizan las aguas del embalse de Mequinenza (CE igual o superior a 1.25 dS/m, Figura 4) para el riego mayoritario de frutales, por lo que pueden producir pérdidas de rendimiento por salinidad. En estos regadíos debe descartarse el riego por aspersión (ya que las aguas tienen concentraciones de Na^+ y Cl^- superiores a 5 meq/L) y promoverse el riego por goteo de alta frecuencia y FL > 0.2. En este sentido, trabajos recientes efectuados por el CITA dentro del proyecto Rideco-Consolider indican problemas potenciales serios de salinización del suelo en riego deficitario controlado donde las FL bajas pueden limitar el lavado de las sales aportadas con el riego.

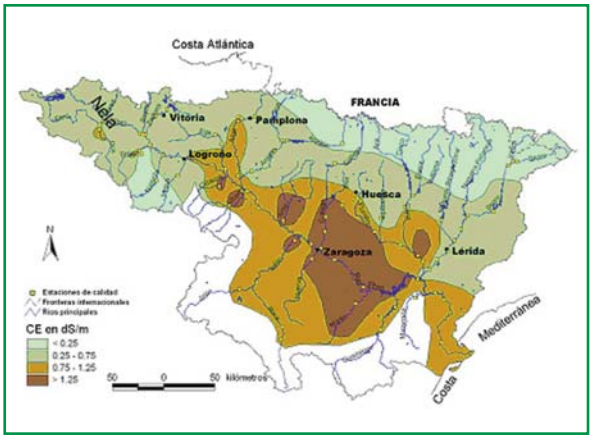

Figura 4. Isolíneas de salinidad (CE, dS/m) de las aguas superficiales de la cuenca del Ebro.

BIBLIOGRAFÍA EN ESPAÑOL

Amézketa, E., Aragüés, R. (1989). *Estabilidad estructural de suelos afectados por sales: Revisión bibliográfica.* An. Edaf. y Agrobiol. XLVIII: 765 785.

Aragüés, R. (1989). *Calidad de las aguas para el riego.* Boletín Agropecuario 13: 37-42.

Aragüés, R., Quílez, D., Isidoro, D. (1996). *Riego, calidad del agua y calidad del suelo: la cuenca del Ebro como caso de estudio.* En «Las aguas subterráneas en las cuencas del Ebro, Júcar e internas de Cataluña y su papel en la planificación hidrológica». Asociación Internacional de Hidrogeólogos. Actas de las Jornadas celebradas en la Universidad de Lleida: 361-367.

Aragüés, R., Cerdá, A. (1998). *Salinidad de aguas y suelos en la agricultura de regadío.* Cap. 12 en «Agricultura Sostenible». Editorial Mundi-Prensa: 249-274.

Convenio CHE-CITA (2005). *Caracterización de la calidad de las aguas superficiales y control de los retornos del riego en la cuenca del Ebro.* http://oph.chebro.es/DOCUMENTACION/Calidad/cemas/inicio.htm.

FAO (1987). Ayers, R.S., Westcot, D.W. *Calidad del agua para la agricultura.* Cuadernos de Riego y Drenaje n.º 29, FAO, Roma.

Isidoro, D., Aragüés, R. (2006). *Calidad de las aguas superficiales y agricultura de regadío en la Cuenca Media del Ebro: una visión de síntesis.* Cap. 7 en «Gestión del Agua en Aragón», Editorial Thomson-Aranzadi: 135-155.

Porta, J., López Acevedo, M., Roquero, C. (1994). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente.* Mundi Prensa. Madrid.

Rideco (2006-2011). *Programa Integral de Ahorro y Mejora Productiva del Agua de Riego en la Horticultura Española.* Proyecto Consolider-Ingenio n.º CSD2006-00067.

Royo, A., Aragüés, R. (1989). *Efectos de la salinidad sobre las plantas: tolerancia, manejo agronómico, genética y mejora.* Diputación General de Aragón.

MINIMIZACIÓN DE IMPACTOS EN LA AGRICULTURA DE REGADÍO

DANIEL ISIDORO. *Unidad de Suelos y Riegos (Unidad Asociada EEAD-CSIC). Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón*
Avda. Montañana 930, 50059 Zaragoza.
disidoro@aragon.es

INTRODUCCIÓN

En climas semiáridos, como el del centro de la Cuenca del Ebro, el regadío es clave para asegurar los rendimientos y garantizar un nivel de vida adecuado a la población rural y contribuye sustancialmente al mantenimiento de la población en áreas rurales. El regadío además confiere una estabilidad a la producción agrícola (reduciendo las diferencias entre años buenos y malos) de gran importancia para los productores y desde el punto de vista de la garantía del abastecimiento. El regadío es una práctica milenaria en la cuenca del Ebro, pero ha experimentado un desarrollo más que notable en el último siglo como resultado de la convicción de que el desarrollo económico de estas tierras debía venir de la mano del regadío.

Pero el regadío tiene también unos impactos sobre el medio natural en muchos casos desfavorables. La preocupación sobre estos aspectos medioambientales del riego es mucho más reciente que la preocupación por asegurar unos rendimientos adecuados y estables y surge de la mayor preocupación social por el medio ambiente [que se traduce en normas como la Directiva Marco del Agua (2000/60/CE) que exigen el *buen estado* de las aguas] y de la competencia cada vez mayor por los recursos hídricos entre los distintos usos (urbanos, industriales, energéticos, medioambientales, lúdicos y agrícolas), sin duda consecuencia directa del desarrollo económico.

Los efectos ambientales del regadío sobre los recursos hídricos son consecuencia de la detracción del agua de los acuíferos o cauces naturales (donde disminuye su disponibilidad) y del uso que se hace de ella, que disminuye la cantidad total de agua [una parte sustancial ha de contribuir a la evapotranspiración (ET) de los cultivos] y da lugar a unos retornos de peor calidad que el recurso original (por el arrastre de sales del suelo-subsuelo y de los agroquímicos que se aportan para incrementar la producción). Además, en ausencia de un drenaje que garantice un lavado suficiente o con un manejo inadecuado, el riego puede dar lugar a la degradación de los suelos regados (lo que en numerosas zonas del mundo ha llevado al abandono de grandes superficies regables) o a la acumulación de sales en zonas de descarga de los flujos subterráneos.

Este artículo pretende dar una visión global de los problemas ambientales del regadío, en especial en la Cuenca del Ebro, y presentar algunas de las estrategias adoptadas para reducirlos en diversas zonas del mundo.

IMPACTO AMBIENTAL DEL REGADÍO

Los impactos ambientales más severos debidos al regadío se corresponden con (a) los efectos internos de degradación del sistema regado (los suelos principalmente); y (b) los efectos sobre las aguas a través de los retornos de riego (efectos externos). A estos habría que añadir los impactos propios de las obras de construcción del regadío (redes de caminos y acequias, tendidos eléctricos y muy especialmente construcción de presas) que no trataremos en este artículo y (c) la emisión de gases de efecto invernadero, ligada a la actividad agrícola como en general a cualquier otra que demande el consumo de combustibles fósiles.

a) Efectos internos del regadío

Acumulación de agua (aparición de una capa freática somera)

La puesta en riego implica introducir en el territorio regado una cantidad de agua muy superior a las entradas naturales. Cuando los suelos regados no

Figura 1. Efecto de la salinidad sobre el crecimiento de una plantación de olivos en Callén (Huesca) en 2001: los olivos de la parte más alejada de la primera hilera se encontraban sobre un suelo más salino y presentaron problemas de crecimiento y de supervivencia al cabo de 3 años. La distribución de la salinidad en esta parcela estaba ligada a una capa freática alta y a una elevación relativa del terreno baja. En las áreas en las que la profundidad de la capa freática era inferior a 120 cm la mortalidad de los árboles fue prácticamente del 100%.

pueden evacuar ese exceso de agua, se llega a producir la aparición de una capa freática somera antes inexistente o la elevación del nivel freático preexistente. Una capa freática demasiado alta afecta al crecimiento de los cultivos pudiendo llegar a producir su muerte (Fig. 1); pero el principal problema de una capa freática muy superficial es que contribuya, por ascenso capilar, a la evaporación desde la superficie del suelo. En ese caso, el agua que se evapora deja en el suelo sus sales disueltas produciendo con el tiempo la salinización del suelo regado.

Salinización y sodificación del suelo

La salinización consiste en la acumulación de sales solubles en el perfil del suelo. Éstas se acumulan en el mismo suelo regado cuando un drenaje insuficiente permite la formación de una capa freática somera como ya hemos visto; pero también puede producirse la acumulación de sales en zonas que reciben el drenaje de las zonas regadas. Un exceso de salinidad en el cultivo limita el crecimiento de las plantas cultivadas (y reduce su rendimiento) pudiendo provocar la muerte de los cultivos (Fig. 1).

Para combatir la acumulación de agua y la salinización in-situ asociada se requiere drenar el exceso de agua. Para ello hay que asegurar el drenaje de los suelos, mediante la instalación de una red de drenaje artificial si el drenaje natural no es suficiente. Cuando la pendiente natural del terreno es tan limitada que el drenaje por gravedad resulta lento o problemático se puede recurrir al «drenaje vertical»: la instalación de pozos que bombean el agua del freático somero y la conducen fuera de la zona regable. Los suelos salinizados pueden recuperarse mediante el lavado. El lavado de los suelos consiste en aplicar grandes volúmenes de agua (mediante riego) para lavar las sales del perfil; pero para que se produzca el lavado es necesario asegurar el drenaje del suelo, instalando para ello si es necesario una red de drenaje.

Es muy importante recordar que todo regadío debe poder evacuar el exceso de agua y de sales. Aún en ausencia absoluta de sales en el suelo, las sales aportadas con el agua de riego podrían llevar a la salinización del suelo por muy baja que sea la salinidad del agua de riego. Por ello es imprescindible para la sostenibilidad del regadío la presencia de una red de drenaje adecuada.

Un aspecto diferente, pero relacionado, es la movilización de sales de estratos salinos por el riego y la acumulación de esas sales en las zonas de descarga de los flujos subterráneos (dentro del área regada o en zonas distantes). En los regadíos de Bardenas, por ejemplo, las tierras de las vales eran tenidas por más productivas en condiciones de secano (suelos profundos, de textura más fina y con mayor capacidad de retención de humedad), mientras que los sasos, con suelos más pedregosos y menos profundos, eran considerados peores tierras. Tras la puesta en riego los colonos descubrieron que los sasos, bien drenados, daban unos excelentes rendimientos; mientras que aparecían problemas de exceso de agua y de salinidad en las vales, donde al riego se unían los flujos de agua procedentes del drenaje de los sasos (a veces también salinos al circular el drenaje sobre la capa impermeable de margas salinas, el «buro»). La modificación del ciclo hidrológico cambia el valor relativo de las tierras. Una estrategia para captar esos flujos salinos es la utilización del «biodrenaje», es decir, la captación de esos flujos por árboles evitando que lleguen a las zonas de descarga. El *biodrenaje* es más eficiente si se lleva a cabo en las zonas de recarga.

Además, en los regadíos tradicionales por superficie, la sistematización de las tierras en pendientes fuertes puede dejar en superficie estratos salinos antes situados en profundidad limitando el crecimiento de los cultivos sobre esos afloramientos (Fig. 2).

La sodificación consiste en la acumulación relativa de sodio en los suelos (el enriquecimiento de los mismos en sodio en relación a su contenido de calcio y magnesio). La sodificación se produce tanto con aguas de riego de muy buena calidad (baja salinidad) aunque no tengan una proporción alta de sodio, como en condiciones de salinidad elevada (porque las sales de calcio y magnesio tienden a precipitar, aumentando así la proporción relativa de

sodio en la solución del suelo). El problema de los suelos sódicos es la pérdida de estabilidad estructural de las arcillas, las partículas más finas de suelo, que se dispersan y taponan los poros del suelo con lo que éste se vuelve impermeable. La sodificación es más difícil de combatir que la salinización, porque la impermeabilización de los suelos previene el lavado de las sales de sodio. Para recuperar los suelos sódicos es necesario aplicar enmiendas que liberen calcio (el yeso o el ácido sulfúrico en terrenos calizos son las más frecuentes) para que pueda sustituir al sodio.

La salinización y sodificación han llevado a la pérdida de la capacidad productiva de los suelos y el abandono de numerosas zonas regables en todo el mundo. De modo generalizado, los problemas de salinización van asociados a un mal manejo del riego (dosis excesivas, drenaje inexistente o no operativo y canales sin revestir) que dan lugar a la acumulación de agua, que lleva a la salinización del suelo, que a su vez causa la salinización de las aguas, a través de un drenaje reducido pero cada vez más salino. Es el caso de los riegos de la cuenca del Mar de Aral (principalmente en Uzbekistán), donde el desarrollo del riego desde 1960 (unos 8 millones de ha) ha reducido los aportes al mar en un 92% (de 56 km^3/año a 4 km^3/año), dando lugar a una reducción del volumen de agua almacenada (de 1.000 km^3 a 75 km^3, que ha llevado incluso a la separación del mar de Aral en dos pequeños lagos) y una elevación sin precedentes de la salinidad (de 3 g/L a 20 g/L en el lago Norte y 70 g/L en el lago Sur). La pesca prácticamente ha desaparecido como recurso y la acumulación de deshechos tóxicos en el fondo del antiguo mar y su movilización por el viento está dando lugar a graves problemas de salud, todo lo cual se ha traducido en una disminución de la esperanza de vida de 65 a 61 años. El riego a manta, excesivo, y los canales sin revestir han dado lugar a una capa freática muy elevada que contribuye entre un 30% y un 60% de la ET total, con la consiguiente salinización del suelo (las pérdidas de rendimiento se estiman entre el 5 y el 30% globalmente). Como respuesta a la pérdida de productividad los agricultores intentan poner en riego más superficie, con lo que las posibilidades de culminar sus cosechas se reducen (en un 16%) por falta de agua. La situación se agrava porque el cultivo más rentable en la zona es el algodón, con una demanda de agua muy elevada, contribuyendo a la disminución de los recursos y a su salinización. Pese a la gravedad de la situación, ésta se debe en gran medida a un manejo inadecuado y puede reconducirse (aunque la práctica del riego a gran escala sea incompatible con el mantenimiento de la situación original). Lejos de esa situación, la salinización/sodificación de los suelos regados también es un problema latente en la Cuenca del Ebro, donde en 1988 se estimaba que el 28% de la superficie de los grandes sistemas regables estaba afectado por salinidad o sodicidad.

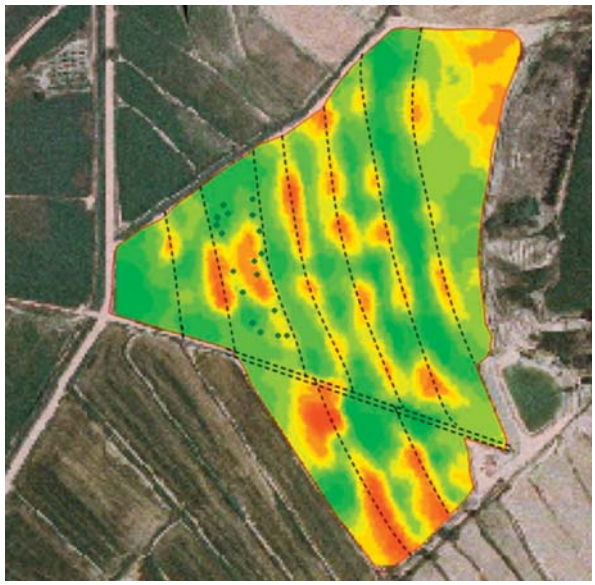

Figura 2. La nivelación, especialmente sin capaceo, en pendientes fuertes hace aflorar a la superficie los estratos profundos de margas salinas ("buro") dando lugar a fajas de salinidad elevada en el suelo en la parte de los tablares más próxima a los taludes y en las zonas de mayores desmontes (en rojo en la figura), mientras que las zonas que han recibido mayores aportes de suelo superficial presentan menor salinidad (en verde en la figura). La foto corresponde a una parcela cultivada de arroz en la zona de El Bayo (Zaragoza).

Finalmente, en zonas costeras el riego con aguas subterráneas puede dar lugar a la *intrusión marina:* al disminuir la recarga neta a los acuíferos costeros respecto a la situación original (por aumento de la ET) la interfaz entre el agua salada y el agua dulce en el acuífero se desplaza hacia el interior y hacia la superficie; con lo que el agua bombeada para riego es cada vez más salina repercutiendo en los rendimientos de los cultivos y en sus posibilidades de utilización. La intrusión marina es ya un problema grave en la mayor parte de los acuíferos mediterráneos españoles.

b) Efectos externos del regadío (sobre la cantidad y calidad del agua)

b.1) Alteración del régimen hidrológico

La consecuencia más directa de la transformación en regadío es la disminución de los recursos hídricos disponibles a escala de cuenca hidrológica: el riego implica dotar de agua a ciertos cultivos para que la transpiren y toda el agua que se transpire dejará de estar disponible en la cuenca para otros usos. Por otro lado, el riego implica normalmente detraer agua en los periodos de mayores caudales y

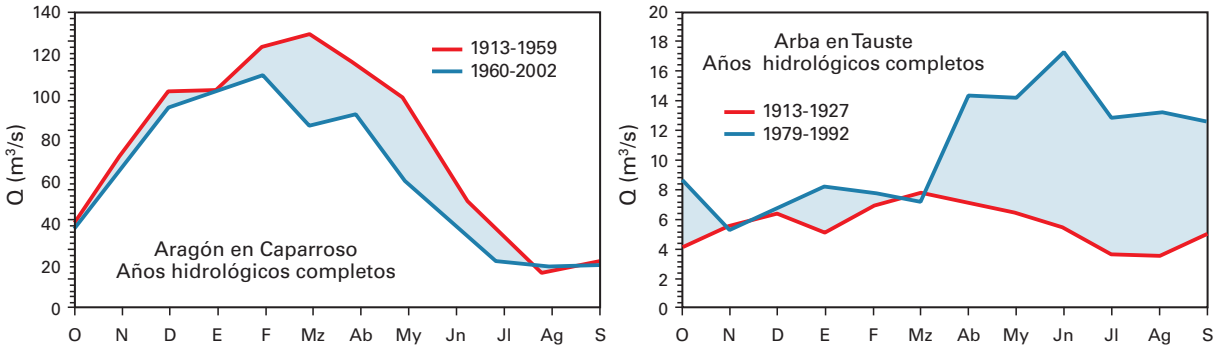

Figura 3. La detracción para riego en el río Aragón a través de la presa de Yesa y el Canal de Las Bardenas ha supuesto un descenso del caudal en el tramo inferior del río Aragón (Aragón en Caparroso, izquierda) especialmente acusado en primavera (333 hm^3/año entre marzo y junio) los meses máximo almacenamiento en el pantano de Yesa; pero a su vez ha dado lugar a un incremento notable (140 hm^3/año) de los recursos disponibles en el río Arba durante los meses de verano (Arba en Tauste, derecha).

almacenarla para su consumo en los períodos de mayor demanda, lo que da lugar a que el volumen de agua disponible durante la estación de riego, normalmente seca, sea mayor que en la situación original (Fig. 3). Cuando los recursos de riego proceden de una cuenca distinta, los retornos de riego pueden dar lugar a una disponibilidad de agua mayor que en el régimen natural original, como ocurre, por ejemplo, con los riegos de Bardenas en la cuenca del Arba (Fig. 3).

Es importante señalar que la modernización de regadíos (actualmente en proceso en muchos regadíos de la Cuenca del Ebro), en cuanto que supondrá una mayor producción (tal y como se está produciendo actualmente, con un cambio en el patrón de cultivos hacia cultivos extensivos de verano y no hacia hortícolas o frutales), traerá consigo un incremento en el uso consuntivo del agua (mayor ET) y por tanto una disminución de los recursos globales; pero también una mejora de la calidad global del agua en cuanto a la salinidad y en cuanto a los contaminantes químicos siempre que estos se manejen adecuadamente (Fig. 9).

b.2) Degradación de la calidad del agua

El drenaje procedente de las zonas de riego (los retornos de riego) va a parar a otras masas de agua, aportando todos los contaminantes que lleva consigo. Los principales constituyentes en el agua de retornos de riego que afectan a la calidad de las aguas son la salinidad, los nutrientes, los sólidos en suspensión y los plaguicidas. Las aguas de retorno de riego no son un cuerpo homogéneo, sino que resultan de la mezcla de varias componentes, cada una de las cuales tiene unas características de calidad diferentes: el drenaje de los suelos regados (cargado en contaminantes solubles: sales, nitrato y algunos plaguicidas; y libre de sólidos en suspensión); las escorrentías superficiales de las parcelas (cargadas en sólidos en suspensión y productos adsorbidos: fósforo y plaguicidas); y las aguas de colas de canales de riego, en general de la misma calidad que el agua de riego y que tiende a diluir los retornos de riego.

La salinidad de los retornos de riego

La salinidad del drenaje de riego obedece al «efecto evapoconcentración» (al producirse la evapotranspiración de una parte sustancial del agua de riego, la concentración del drenaje ha de ser mayor que la del riego para mantener el balance entre las sales aportadas por el riego y las extraídas por el drenaje) y el «efecto aporte» (meteorización de los minerales o disolución de yeso o sales solubles por las aguas de drenaje en el suelo y sub-suelo). Generalmente, y más en medios áridos y semiáridos donde son frecuentes los depósitos salinos, el efecto aporte es más importante que el efecto evapoconcentración.

En todo el mundo abundan los ejemplos de los problemas de salinidad debidos a la movilización de sales por el riego. En Australia, la puesta en riego de extensas zonas en la cuenca del río Murray-Darling ha dado lugar a la recarga de acuíferos profundos muy salinos, antes desconectados del río Murray. Al subir el nivel de estos acuíferos, comenzaron a drenar hacia los ríos aumentando considerablemente su salinidad. La solución por la que han optado en Australia, ha sido el bombeo del agua de estos acuíferos hacia humedales artificiales (Fig. 4) evitando que se incorporen a los ríos y manteniendo así la salinidad de los mismos relativamente baja y con ello sus opciones de uso. Sin embargo, el principal pilar (y el más innovador) en la lucha contra la salinización en la cuenca del Murray-Darling ha sido la creación de un sistema de créditos y débitos de salinidad dentro de una iniciativa de manejo a escala de cuenca hidrológica (hay que decir que España es pionera en la ges-

Figura 4. Sistema de intercepción de sales (SIS) en la cuenca del Murray-Darling (Australia): la estación de bombeo (izquierda) es una de las que forman el SIS de Waikerie y que interceptan el flujo del acuífero muy salino (~ 20 g/l) movilizado por el riego, especialmente de plantaciones de cítricos, y que descarga hacia el río Murray, apenas 100 m detrás de la estación, y la conducen hasta la laguna artificial de Stockyard (derecha) que se ha convertido en una reserva de vida silvestre.

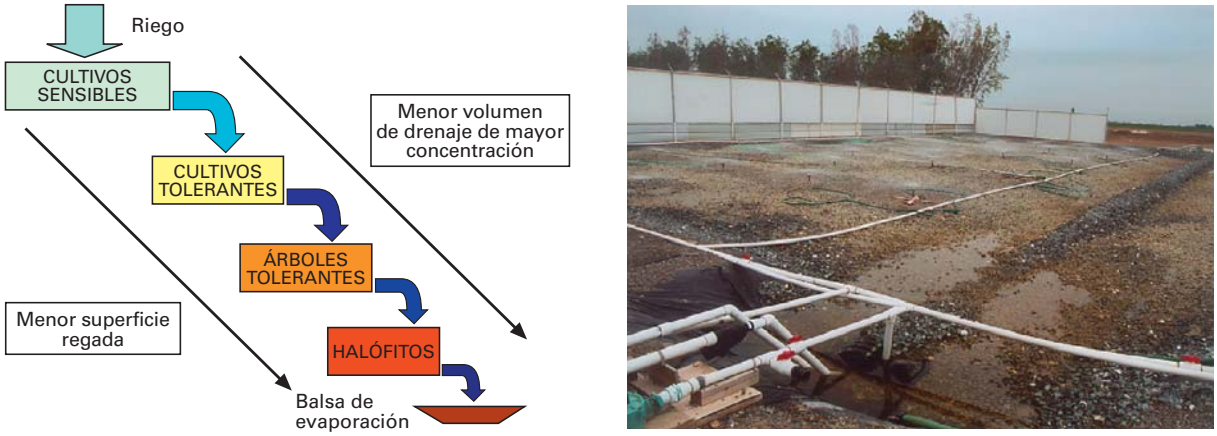

Figura 5. Esquema de la reutilización secuencial del drenaje (izquierda) y balsa de evaporación (derecha) en el Valle de San Joaquín de California (EE.UU.) El drenaje (muy reducido y muy concentrado por la sucesiva reutilización del agua de drenaje de cultivos progresivamente más tolerantes a la salinidad) de la explotación es conducido a la balsa donde se evapora y deja las sales arrastradas.

tión del agua a escala de cuenca). Por este sistema, se contabilizan como créditos los proyectos que tienden a disminuir la salinidad en las aguas de la cuenca (construcción de sistemas de intercepción de sales, por ejemplo) y como débitos los que la incrementan (creación de nuevas zonas regables o construcción de drenes, por ejemplo); y se les asigna un valor de sales retiradas o aportadas. Los estados ribereños han de compensarse por los créditos-débitos alegados para mantener la salinidad en distintos tramos del río y los aportes totales de las sub-cuencas por debajo de unos límites prefijados.

En algunos casos, la movilización de sales de estratos salinos lleva consigo el arrastre de elementos tóxicos. Es el caso del riego del sector occidental del Valle del San Joaquín, en California (EE.UU.), donde las aguas de drenaje cargadas de selenio del dren de San Luis afectaron gravemente a la fauna del humedal receptor (el refugio de vida salvaje de Kesterson). En California se llegó a prohibir la emisión de agua de drenaje desde las zonas regadas lo que ha dado lugar a los sistemas de reaprovechamiento secuencial del agua de drenaje: los cultivos de mayor valor económico, sensibles a la salinidad, se riegan con el agua más adecuada, menos salina; cuyo drenaje se utiliza para regar cultivos más tolerantes a salinidad (forrajes normalmente); el drenaje de estos riegos se emplea en cultivos leñosos más tolerantes (eucaliptos normalmente) y el drenaje de estas tierras se emplea en el riego de plantas muy tolerantes a la salinidad (halófitas). Finalmente el drenaje muy salino de estas tierras se lleva (mediante aspersores para favorecer la evaporación del agua) a balsas de evaporación, impermeabilizadas, donde se acumulan y de donde se retiran periódicamente (Fig. 5).

Los nutrientes en las aguas de drenaje

Los nutrientes principales son el nitrógeno (N) y el fósforo (P), ambos esenciales para el desarrollo de los cultivos y aportados en grandes cantidades en la agricultura de los países desarrollados mediante la fertilización mineral y orgánica. El nitrógeno suele presentarse en forma de nitrato (NO_3^-) disuelto en el agua, aunque también se presenta en menor medida como amonio disuelto (NH_4^+) y como nitrógeno orgánico asociado a las partículas en suspensión. El fósforo, en cambio, se presenta sobre todo adsorbido a los sólidos en suspensión (partículas orgánicas y de suelo suspendidas en el agua) aunque una parte se presenta como fosfato disuelto (PO_4^{3-}). Dado que el N se encuentra principalmente disuelto, suele presentar mayores problemas en aguas subterráneas (contaminación de acuíferos) aunque también llega a producir problemas en aguas superficiales; mientras que el P también puede ser un problema en ambos tipos de aguas, pero lo es con mayor frecuencia en las aguas superficiales.

El exceso de N y P da lugar a la eutrofización de los lagos y embalses, e incluso de las aguas costeras en torno a los deltas y estuarios de ríos. La eutrofización es un grave problema ambiental que da lugar a la muerte de las algas y los peces y al consumo del oxígeno disuelto en el agua. En numerosas zonas agrícolas del mundo está comprobado que el nitrógeno del agua procede en gran medida del lavado del fertilizante nitrogenado aplicado a los cultivos, y en el caso de zonas áridas, donde la agricultura de regadío recibe la mayor parte de la fertilización, del regadío, como muestra la Figura 6 para la Cuenca del Ebro.

Frecuentemente los aportes de nutrientes en el agua de drenaje (es decir, la masa de P y N exportada desde las zonas regables) sigue claramente a las aportaciones de fertilizantes siempre que haya unos flujos de agua que arrastren esos aportes de fertilizantes: las lluvias de invierno o, especialmente, el riego (Fig. 7). En ese sentido, aplicar el riego de tal manera que minimice las salidas de drenaje es una de las claves par reducir las exportaciones de N y P. Los riegos por aspersión y por goteo, más eficientes que el riego tradicional por inundación, originan un volumen de drenaje menor (aunque más concentrado) y arrastran una cantidad de N menor como muestra la Tabla 1. La otra estrategia para reducir las emisiones de nutrientes es adaptar las fechas de fertilización a las necesidades de los cultivos y acoplar adecuadamente las fechas de riego y fertilización (no aplicar riegos ineficientes inmediatamente después de la fertilización de fondo, por ejemplo); objetivos mucho más asequibles también con sistemas de riego por aspersión o goteo.

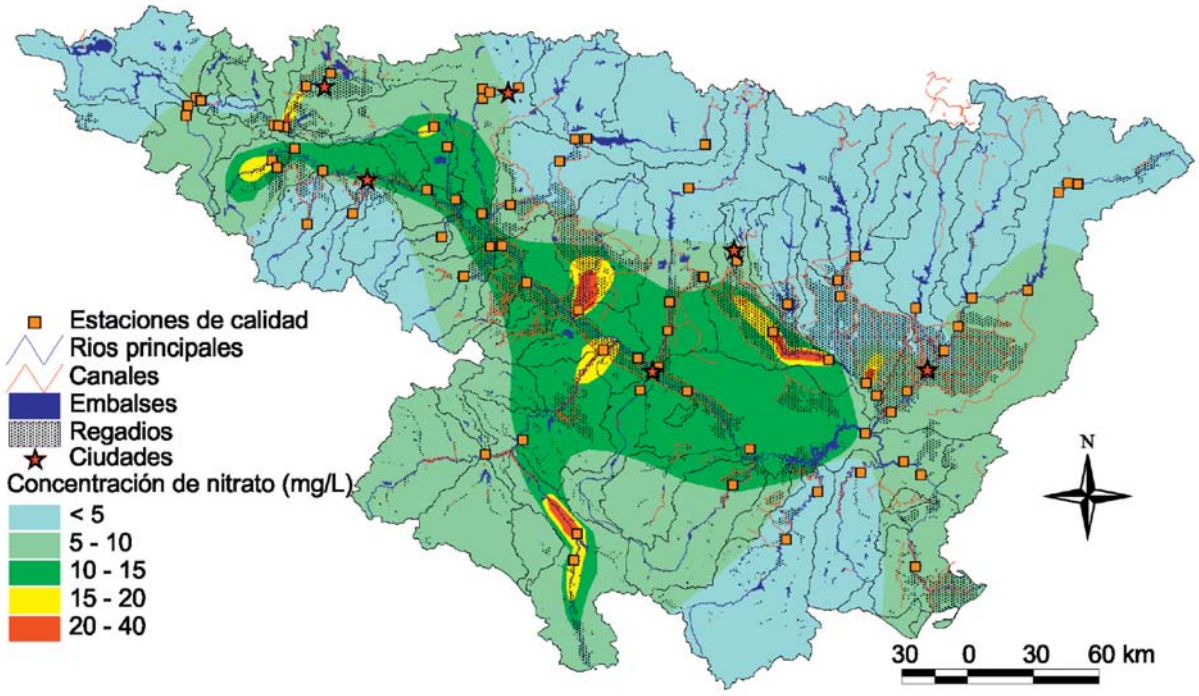

Figura 6. Zonas regables y concentración de NO_3 en las aguas superficiales de la Cuenca del Ebro (1987-90). Algunas de las zonas con mayores concentraciones de NO_3 (ríos Arba, Flumen-Alcanadre, Clamor Amarga, Alto Jiloca, Bajo Jalón y Tirón) se corresponden con cuencas con un desarrollo importante del regadío.

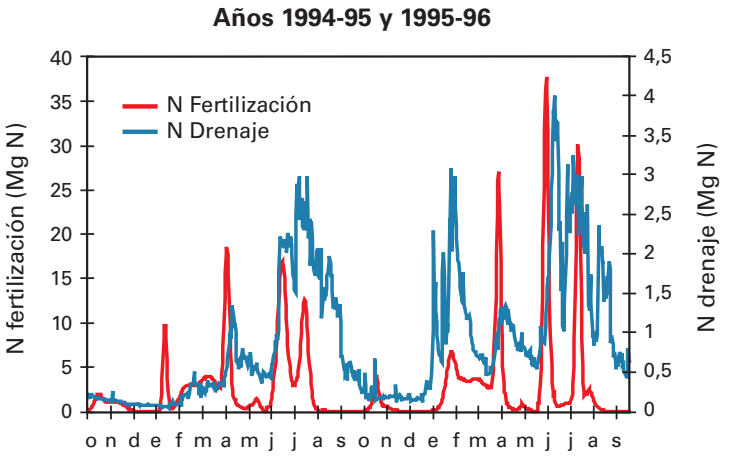

Figura 7. La masa de nitrógeno exportada por el drenaje (N Drenaje) refleja la cantidad de nitrógeno aplicada con la fertilización (N Fertilización) y movilizada por el riego y la precipitación en la zona regable de Almudévar (Huesca). En conjunto, un 30% del nitrógeno aplicado con la fertilización mineral y orgánica en los años 1995 y 1996 en Almudévar se perdió con las aguas de drenaje.

	Drenaje (mm)	NO_3 (mg/L)	MN (t N/año)	% Fert
La Violada	618	40.3	83.2	30%
D-IX	76	122.8	14.2	8%
D-XI	194	102.3	24.8	22%

Tabla 1. Volumen de drenaje, concentración de nitrato (NO_3) en el agua de drenaje, masas de nitrógeno exportadas (MN, toneladas) y porcentaje que supone la masa exportada sobre las entradas por fertilización (% Fert) en tres zonas de regadío de la Cuenca del Ebro entre 1995 y 1998. La cuenca de La Violada, regada por superficie, presentó una concentración menor de NO_3 en el agua de drenaje, pero una masa de nitrógeno exportada mucho mayor que las cuencas de los colectores D-IX y D-XI en Monegros II (riego por aspersión), puesto que el drenaje (y también el riego) fue mucho mayor. El porcentaje de N exportado por el drenaje sobre el aplicado por fertilización también fue mayor en el caso de La Violada, lo que se traduce en una mayor pérdida económica. Las diferencias entre D-IX y D-XI se deben sobre todo al patrón de cultivos.

La reducción de las dosis de fertilizantes (nitrogenados) que se aplican a los cultivos es otra estrategia para reducir la contaminación inducida por la agricultura y en particular por el regadío. En España, la Directiva de nitratos (91/676/CE) recoge en los códigos de buenas prácticas agrarias y en los planes de actuación de las *Zonas Vulnerables* (zonas de recarga de masas de agua superficiales o subterráneas que contienen mas de 50 mg/l de nitrato o pueden llegar a contenerlo si no se protegen) medidas para la reducción de la contaminación por nitrato, que hacen incidencia específicamente en el uso de las deyecciones ganaderas, los periodos en que no es conveniente la aplicación de fertilizantes, las limitaciones en la aplicación de fertilizantes a las tierras que sea compatible con las prácticas agrarias correctas, dosis máximas y momentos de aplicación, y al manejo del riego.

Sólidos en suspensión

Los sólidos en suspensión en las aguas de drenaje indican en primer lugar un problema de arrastre de suelo de las zonas regadas, es decir, de erosión. Los sedimentos en sí dan lugar al aterramiento de los lagos y embalses, pueden impedir el paso de la luz y degradar las zonas de desove de los peces, y alteran el comportamiento hidráulico de los cauces, lo que puede dar lugar a problemas en caso de avenidas. Otro aspecto relevante de los sedimentos es que pueden llevar asociados ciertos contaminantes (fósforo y algunos plaguicidas, sobre todo), convirtiéndose a largo plazo en una fuente de los mismos al agua de los ríos.

Contaminación por plaguicidas

Los plaguicidas difieren de los demás contaminantes del regadío por su alta toxicidad para el medio biológico y para el hombre y por la complejidad de su comportamiento en el medio. Los principales efectos tóxicos de los pesticidas sobre los seres vivos son la muerte, aparición de tumores, problemas reproductivos, inmunológicos y hormonales y malformaciones.

La complejidad viene determinada por los fenómenos de *degradación* y de *partición.* La degradación consiste en que los plaguicidas se descomponen en otras sustancias, sus metabolitos, a veces tan tóxicos o más que los mismos plaguicidas apli-

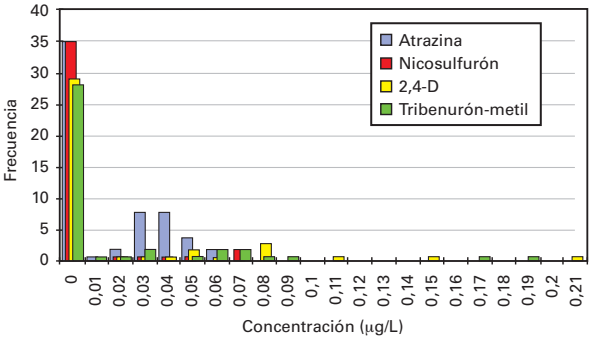

Figura 8. Numero de veces (Frecuencia) que se ha encontrado un plaguicida a una concentración determinada (eje X) en el Bco de La Violada (Almudévar, Huesca) entre 2006 y 2009. A pesar de no utilizarse apenas en esos años, el plaguicida con un mayor número de detecciones fue la Atrazina, un plaguicida muy empleado en años anteriores en el cultivo de maíz, lo que refleja su persistencia en el medio. Las concentraciones máximas, aunque con un menor número de detecciones, corresponden al Tribenurón-metil y al 2,4-D empleados en el cultivo de cebada, dominante en Almudévar en 2006-2009. El Nicosulfurón, detectado menos veces y con concentraciones en general menores que el Tribenurón-metil y 2,4-D se empleó en el cultivo de maíz.

cados y que también es necesario analizar para establecer el grado de contaminación de las aguas o del suelo. Es el caso, por ejemplo, del DDT que se transforma en otras formas tóxicas, el DDD y el DDE; o de la Atrazina, tan utilizada hasta hace poco en el cultivo de maíz, que se transforma en Desetil-atrazina.

La partición consiste en el fraccionamiento del plaguicida aplicado en diversas partes del medio: adsorción a las partículas del suelo, absorción por los microorganismos, volatilización, disolución en el agua, etc. Esta distribución del plaguicida por todas las fases del medio hace que para establecer la cantidad de plaguicida en el mismo no sea suficiente con muestrear, por ejemplo, el agua de los ríos, sino que también sea necesario muestrear el resto del medio: los suelos, sedimentos en los fondos de los ríos y, especialmente, los seres vivos o *biota* (muestreo multi-media). La necesidad de muestrear la *biota* se deriva también de la tendencia de algunos plaguicidas a acumularse en los tejidos grasos de los seres vivos, lo que se denomina *bio-concentración* (como el DDT por ejemplo; otros, en cambio, se suelen excretar fácilmente, como el Glifosato) y por su tendencia a acumularse en mayor concentración en los niveles superiores en la cadena trófica *(bio-acumulación)*. Todos estos procesos hacen que los plaguicidas puedan permanecer en el medio largo tiempo y que se sigan encontrando concentraciones apreciables mucho después de su utilización (persistencia). La Figura 8 presenta a modo de ejemplo las concentraciones encontradas en el Bco de La Violada de los plaguicidas más utilizados en la zona.

Masa o concentración

El efecto que las aguas de retorno de riego tienen sobre la masa de agua que los recibe viene determinado por la masa de contaminante en las aguas de retorno, no por su concentración. Ciertamente las posibilidades de utilización directa de las aguas de drenaje están determinadas por la concentración de los contaminantes en el drenaje, pero la concentración de los contaminantes en el cuerpo de agua receptor aumenta con la masa de contaminante que le aporta el drenaje, independientemente de su concentración, como se muestra para un caso sencillo de lavado de sales en la Figura 9.

Puesto que es la masa de los retornos la que da lugar a la contaminación de las aguas receptoras, la estrategia general para reducir la contaminación debida al riego es reducir los retornos de riego (en la medida de lo posible: como ya se ha visto, siempre es necesario que exista un drenaje desde las zonas regables que evite la acumulación de sales en el suelo). Ya se han comentado algunas estrategias para disminuir (incluso eliminar) los retornos de riego o para evitar su incorporación a las aguas naturales. Junto a ellas, una estrategia fundamental, asequible en medios como el nuestro es la mejora de la eficiencia de riego: es decir, disminuir la fracción de drenaje. En este sentido, como también se ha visto, la utilización de riegos por aspersión o goteo (que permiten regular mejor las aplicaciones de agua y de nutrientes) es una medida que contribuye a preservar la calidad de las aguas naturales.

La importancia de la masa aportada por cada fuente contaminante se traduce en EE.UU. en una aproximación al control de la contaminación conocida como *Masas Totales Máximas Diarias* (TMDL). Esta aproximación consiste en asignar a un tramo de río o cuerpo de agua una concentración máxima admisible de un cierto contaminante (en función de los usos previstos para esa masa de agua), identificar todas las fuentes puntuales y difusas de ese contaminante en su cuenca y asignar a cada fuente una masa máxima que puede emitir para no llegar a exceder la concentración admisible. Esta aproximación requiere un buen inventario de las fuentes contaminantes en la cuenca y un conocimiento adecuado del comportamiento del contaminante en la misma, que muchas veces necesita de la utilización de modelos de simulación.

c) Emisión de contaminantes atmosféricos (gases de efecto invernadero)

Finalmente, por la importancia que está tomando la problemática del calentamiento global, habría que

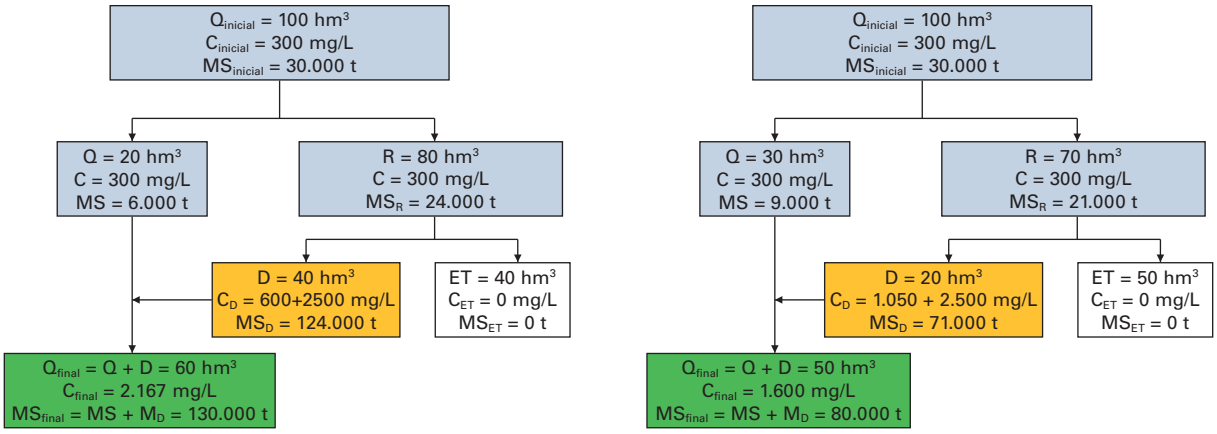

Figura 9. El aumento de la concentración salina en el cauce receptor de los retornos de riego resulta ser mayor en el caso de un drenaje (D) elevado con una concentración baja (izquierda) que cuando el drenaje es muy bajo a pesar de llevar una salinidad más alta, según se muestra en este ejemplo de una zona con yeso regada por superficie (izquierda) o aspersión (derecha) donde las concentraciones (C en mg/L) y las masas de sales (MS, t) se han calculado por balance de masas, añadiendo a la concentración del drenaje 2500 mg/L correspondientes a la saturación en yeso (reflejando el predominio del efecto aporte en la salinidad del drenaje). Ambos ejemplos responden a situaciones típicas en la Cuenca del Ebro: concentración baja del agua de riego (300 mg/L), detracción de las aguas de un río y presencia de yeso. Partiendo de la misma agua disponible ($Q_{inicial}$ con una concentración $C_{inicial}$), a la izquierda se presenta un riego por superficie tradicional, con una fracción consuntiva baja (ET/R = 50%) y a la derecha el mismo regadío en riego por aspersión, con una detracción para riego (R) menor (70 hm³ en lugar de 80 hm³) y una fracción consuntiva más elevada (ET/R = 71%). El ejemplo pone manifiesto además que la modernización del regadío dará lugar a una disminución de la cantidad total de agua disponible (mayor ET y por tanto menor D y menor Q_{final}) y a un agua final de mejor calidad (menor concentración del recurso final C_{final}).

considerar entre los efectos externos del regadío la emisión de gases de efecto invernadero: el CO_2 originado por el consumo de combustible para las labores y el riego; el CH_4 (metano) ligado a las explotaciones ganaderas y al cultivo de arroz; y el N_2O, cuya emisión se ve favorecida por una elevada humedad del suelo y por un uso excesivo de fertilizantes nitrogenados. Por el contrario, un manejo adecuado de los suelos regados que incrementara su contenido en materia orgánica (tradicionalmente bajo en nuestro medio) contribuiría a la fijación de C atmosférico y por tanto a paliar el calentamiento global.

CONCLUSIONES

El regadío es una práctica necesaria en climas semiáridos para mantener una producción agrícola suficiente y estable y un nivel de vida adecuado para la población rural, así como una cierta densidad de población en áreas rurales.

Por otro lado, el regadío implica la utilización de un volumen importante de agua (en zonas donde normalmente no es un recurso abundante) consumiendo una parte (y por tanto disminuyendo los recursos globales) y devolviendo la parte no utilizada con una calidad peor que la del agua detraída. El empeoramiento de la calidad del agua de drenaje obedece al lavado de sales de los suelos regados y al arrastre de agroquímicos empleados en la agricultura de regadío, normalmente intensiva. El lavado de sales de los suelos regados, aunque contribuya a la salinización de los cauces receptores, es necesario para evitar la salinización de los suelos; un factor que ha contribuido a la inviabilidad del riego en numerosas zonas regables del mundo.

La norma general clave para impedir la salinización (y en parte la sodificación) de los suelos regados es mantener un drenaje adecuado. Las claves para reducir la contaminación de las aguas por los retornos de riego son (i) la reducción de los retornos mediante riegos más eficientes y (ii) el uso racional de los medios de producción (fertilizantes y plaguicidas) utilizando dosis adecuadas a las necesidades de los cultivos y eligiendo correctamente las fechas de aplicación para evitar el lavado por las lluvias y sobre todo por el riego.

Asegurar la sostenibilidad del regadío, es decir el mantenimiento a largo plazo de una productividad suficiente con unos costes ambientales y sociales aceptables, requiere un control continuo de la calidad de los retornos de riego y de las propiedades de los suelos (nivel freático, salinidad y sodicidad) que permita identificar los problemas ambientales conforme vayan surgiendo y profundizar en la relación entre las prácticas de manejo del riego y sus consecuencias ambientales. En este sentido es imprescindible la continuidad de las redes de control puestas en marcha por las comunidades generales de regantes y la Confederación Hidrográfica del Ebro.

ESTUDIOS REALIZADOS EN RIEGOS DEL ALTO ARAGÓN

FARIDA DECHMI, DANIEL ISIDORO, MARIA BALCELLS, IGNACIO CLAVERÍA, AHMED SKHIRI Y YOLANDA GIMENO
Unidad de Suelos y Riegos (Unidad Asociada EEAD-CSIC). Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA-DGA). Avda. Montañana 930, 50059 Zaragoza (España).
fdechmi@aragon.es; www.cita-aragon.es

Riegos de Alto Aragón. Avenida Ramón y Cajal nº 96, 22006 Huesca (España).
ygimeno@cg-riegosaltoaragon.es; www.riegosdelaltoaragon.es

INTRODUCCIÓN

La preocupación sobre la calidad de las aguas se refleja en distintas directivas europeas como la de nitratos (91/676/CEE), la de control y prevención integrado de la contaminación (96/61/EC) o la Directiva marco del agua (2000/60/EC). La **Directiva Marco del Agua** (EU, 2000) tiene como principal objetivo alcanzar unos estándares de calidad de las aguas de la Unión Europea en el año 2015, así como asegurar unos volúmenes que permitan el mantenimiento de los ecosistemas. Los primeros informes de la Directiva Marco indican que la **eutrofización** es el problema más importante en todo el territorio europeo y que la actividad agrícola es el principal contribuyente a la pérdida de nutrientes (N, P). Este estado de la calidad del agua puede exigir una **reducción drástica de las pérdidas de nutrientes en los sistemas agrícolas** que puede tener repercusiones sobre la sostenibilidad económica y ambiental del regadío a largo plazo. Entre sus requisitos, la Directiva Marco del Agua exige a los estados miembros establecer un **programa de medidas de control** para fuentes difusas de contaminación, entre los que se encuentran los vertidos difusos provenientes de la **agricultura de regadío.**

A nivel nacional, las Confederaciones Hidrográficas, responsables del control de la calidad de las aguas, han implementado **redes de análisis de calidad en los principales ríos de sus cuencas** (CHE, 2009). Para cumplir con las exigencias de la Directiva Marco de Agua, la **Comunidad General de Riegos del Alto Aragón** (RAA) realizó un **seguimiento de la calidad de las aguas superficiales** dentro de su red de drenaje durante las estaciones de riego de 2005 y 2006. Esa primera base de datos sobre la cantidad y la calidad del agua de los retornos de riego sirvió de base para iniciar en el año 2007 el desarrollo de una red de control detallado de las concentraciones y masas exportadas (nitratos, fosfatos y salinidad) por la red de drenaje de la RAA, dentro de los proyectos «Control de la calidad medioambiental de los retornos de riego en la Comunidad General de Riegos del Alto Aragón» y «Evaluación y medidas de control de fuentes difusas de contaminación del agua para la sostenibilidad económica y ambiental de los sistemas agrícolas de regadío en Aragón». Ambos proyecto son financiados por la CAIXA en concepto de ayuda a las actividades de I+D, y RAA a través principalmente la construcción de los aforos requeridos, y que representan la inversión mas importante de los dos proyectos.

RED DE CONTROL DE LOS DRENAJES DE RAA

Consiste en 18 puntos ubicados como muestra la Figura 1. Sin embargo, el análisis de los datos de la red de la RAA se centra en 15 puntos de muestreo que tienen valores medidos de calidad de agua. Los datos analizados son caudal en el momento de la toma de muestra, pH, conductividad eléctrica (CE), los principales iones disueltos, fosfato (PO_4^{3-}), nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-), amonio (NH_4^+). El análisis de los datos de la dicha rede indicó que la salinidad (CE), nitratos, amonio, fosfatos son los contaminantes más relevantes en las aguas superficiales de la zona (Dechmi y col., 2008). El 74 % de los desagües de la red de mediciones de RAA presenta concentraciones de PO_4 que superan el valor límite de 0,30 mg/L PO_4. En cuanto al nitrato, en ninguna base de datos analizada se han registrado valores superiores a los 50 mg/L (límite máximo admisible) pero sí son frecuentes valores altos y superiores al nivel guía de 25 mg/L.

RED DE CONTROL DETALLADO

Consiste principalmente en el seguimiento de la calidad de las aguas de drenaje en 6 puntos de la red de control de RAA ya designada, y ubicados dentro de la cuenca hidrográfica del río Alcanadre (Fig. 1). El trabajo comenzó en octubre de 2007 con tres objetivos específicos: (1) el seguimiento global de la calidad del agua de los retornos de riego y determinación de masas exportada de sales, nitrógeno y fósforo; (2) la realización del balance de masas en una cuenca o dos que permitirá identificar las fuentes principales de contaminación agraria; y (3) la calibración de un modelo medioambiental que permitiría un mejor conocimiento de los procesos que gobiernan la contaminación difusa en condiciones locales de los regadíos en Aragón.

A continuación, se presenta principalmente los aspectos metodológicos donde se detallan las ubicaciones de los puntos de control de aforo y calidad de agua en cada cuenca, los parámetros hidroquímicos analizados, la periodicidad en la toma de muestras así como todas las tareas que se están realizando para llevar a cabo los objetivos planteados en estos dos proyectos.

METODOLOGÍA APLICADA

Los 6 puntos de control corresponden a los puntos de drenaje denominados P4, P5, P7, P9, P10 y P11 (Fig. 1) con superficies regadas en sus cuencas de drenaje de entre 1.700 y 4.500 ha. La brigada de RAA instaló cuatro (04) estaciones de control (Fig. 2) y pequeñas casetas, para albergar los equipos de registro de alturas y de muestreo automático en su caso (Fig. 3), en los puntos de drenaje denominados P4, P5, P9 y P11. Las dos otras estaciones de aforo se realizaran a lo largo del 2011. Los puntos denominados P11 (periodo I: 2007-2011) y P4 (periodo II: 2009-2011)

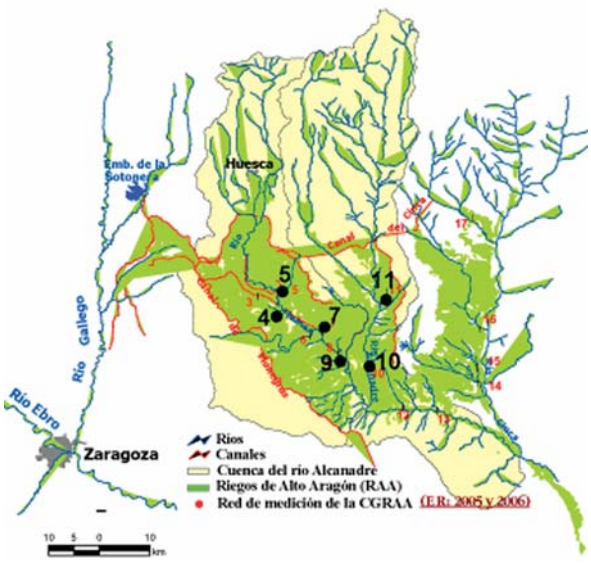

Figura 1. Ubicación de los puntos de la red de control de la calidad del agua de drenaje de la comunidad General de Riegos de Alto Aragón. Los puntos marcados en negro pertenecen a la rede de control detallado.

Figura 2. Fotos de las estaciones de aforo construidas por la brigada de la Comunidad General de Riegos de Alto Aragón en los puntos de control P9, P5 y P11.

Figura 3. Equipos de (a) medición del caudal (Thalimedes), (b) toma de muestras de agua automático y (c) labores de recogida de las muestras de agua.

han sido elegidos para llevar a cabo los objetivos 1, 2 y 3 mientras que en el resto de los puntos, se esta realizando solo las tareas del objetivo 1 durante el periodo I (P5 y P9) y el periodo II (P7 y P10).

Medida de caudal, toma de muestras de agua y suelos, y encuestas a agricultores

En el P11 y a partir de la instalación de los equipos de medida, se han tomado muestras de agua y se ha medido el caudal con una frecuencia diaria. En P5 y P9 y para el año hidrológico 2008, se han tomado muestras de agua y se ha medido el caudal con periodicidad mensual o quincenal. Mientras que para el resto del periodo, se ha cambiado la frecuencia de la medición del caudal (frecuencia diaria) y se ha mantenido la del muestreo del agua. En el resto de los puntos (P4, P7 y P10) y a partir de octubre 2009, se han tomado muestras de agua y se ha medido el caudal con periodicidad mensual o quincenal. Además, se ha llevado a cabo un muestreo de suelo en las cuencas que drenan en el P5, P9 y P11 para determinar las características hídricas y físico-químicas de los suelos de la zona de estudio.

En todas las muestras de agua se analizó en el laboratorio los elementos contaminantes con mayor incidencia en la eutrofización de las aguas superficiales: nitrógeno (N) y fósforo (P); así como la conductividad eléctrica (CE). En algunas muestras se efectuaron análisis iónicos completos (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, Cl^{-}, SO_4^{2-} y HCO_3^{-}) y también sólidos en suspensión (SS) y sólidos disueltos totales (SDT). En cuanto a los suelos, se determinaron en el laboratorio la capacidad de campo, punto de marchites, textura, humedad y P Olsen.

Por otra parte, se llevo a cabo 195 encuestas de fertilización y prácticas de abonado durante las dos campañas 2008 y 2009. El objetivo fue establecer las dosis y fechas de los tratamientos fitosanitarios de cada cultivo y las prácticas de fertilización realizadas. Junto a esta información, se ha determinado el volumen de riego medio, el intervalo medio entre riegos para cada cultivo y el rendimiento medio, datos necesarios para calibrar el modelo (Objetivo 3).

Masa exportada y balance de agua, sales y nutrientes

Las masas de sales (MS), nitrato (MN) y fósforo (MP) a la salida del sistema, se estiman como el producto entre los volúmenes de agua diarios y las concentraciones respectivas en el punto P11. Dado que

las concentraciones en los otros puntos no se midieron diariamente sino cada mes, para la estimación de las masas de sales, nitrato y fósforo se consideraran los caudales medios mensuales.

Para la cuenca del P11, el balance hídrico ha sido calculado para el periodo octubre 2007 - septiembre 2009 considerando las principales entradas y salidas de agua que se muestran en la ecuación siguiente:

$$\Delta A = (P + R + LF + AR) - (ET + DS + PEA) \quad [1]$$

Donde ΔA es el error del balance de agua, las entradas del balance son los volúmenes de agua de las precipitaciones (P), del riego (R), del lavado del filtro (LF) de la estación de bombeo de agua situada dentro de la cuenca y las aguas residuales (AR); y las salidas son los volúmenes de agua de la evapotranspiración del cultivo (ET), el drenaje superficial a través del arroyo del Reguero (DS) y las pérdidas por evaporación y arrastre (PEA).

Para calcular el balance de masas de sales y nutrientes (N y P), se determinó el valor de concentración de sales, N y P de cada uno de los componentes del balance de agua excepto la ET y la PEA que se consideraron libres de estos elementos. El producto entre concentraciones y volúmenes de agua es la masa asignada a cada componente. También, se tuvo en cuenta en el cálculo del balance de N y P las entradas por vía de la fertilización mineral (NFM y PFM) y orgánica (NFO y PFO) determinadas mediando encuestas y las salidas por vía de extracción de los cultivos (NE y PE). El incremento de las masas de sales (ΔS), nitrógeno (ΔN) y fósforo (ΔP) en el sistema se calcularon como sigue:

$$\Delta S = (SP + SR + SLF + SAR) - (SDS) \quad [2]$$

$$\Delta N = (NP + NR + NLF + NAR + NFM + NFO) - (NDS + NE) \quad [3]$$

$$\Delta P = (PP + PR + PLF + PAR + PFM + PFO) - (PDS + PE) \quad [4]$$

Elección y calibración de un modelo hidrológico

Se ha seleccionado el modelo hidrológico de cuenca SWAT (Soil and Water Assessment Tool). La calibración y la validación del modelo se llevarán a cabo con los datos registrados en el P11 durante los tres primeros años del proyecto. Al final de esta tarea se dispondrá de una herramienta que permitirá: (a) una reducción de los costes de investigación relacionada con la calidad medioambiental de los flujos de retorno de riego; (b) avanzar en el conocimiento de la dinámica de los flujos de retornos de riego y sus relaciones con las características físicas y de manejo agronómico y (c) identificar las prácticas agrarias sostenibles.

RESUMEN RESULTADOS OBTENIDOS (CAMPAÑA DE RIEGO DE 2008 Y 2009)

El seguimiento realizado en los puntos controlados durante las campañas de riego del año 2008 y 2009 (P5, P9 y P11) mostró que la calidad del agua presenta una alta variabilidad entre cuencas que es debida a las características particulares y de manejo en cada una de ellas. En el punto de control P11 que drena una zona de riego por aspersión y donde predomina el cultivo de maíz, se han registrado valores de concentración de nitrato superiores a los 50 mg/L, mientras que en los otros dos puntos (P5 y P9) que drenan zonas regadas por superficie, la concentración de nitrato nunca ha alcanzado el valor máximo admisible (50 mg/L). La concentración de nitrato ha superado el valor guía (25 mg/L) en todas las muestras recogidas en el P9 y solo tres veces en el P5 durante 2008. En cuanto al fósforo, se observó que casi todas las aguas que circulen por el desagüe P11 presentan valores altos y superiores al umbral de riesgo de eutrofización de 0,02 mg/L (Skhiri y col, 2009).

BIBLIOGRAFIA

Dechmi, F., Isidoro, D., Gimeno, Y., 2008. "Calidad del agua de los retornos de riego en la comunidad general de riegos del alto Aragón". Actas del XXIV Congreso Nacional de Riegos y Drenaje, Huesca (España). Asociación Española de Riegos y Drenajes (AERYD). 65-66.

Skhiri A., Dechmi, F., Clavería, I., 2009. Calidad de aguas de los flujos de retorno de riego de la cuenca del arroyo del reguero. Actas del XXV Congreso Nacional de Riegos y Drenaje, Murcia, 16-18 de junio de 2009. Asociación Española de Riegos y Drenajes (AERYD).

European Union (EU), 2000. Directive 2000/60 of the Parliament and of the council establishing a framework for community action in the field of water pollution. Official Journal. L 330: 32-54 pp.

RIEGOS
del alto aragón

cita
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA DE ARAGÓN

FONDO SOCIAL EUROPEO
«El FSE invierte en tu futuro»

walqa
Parque Tecnológico

GOBIERNO DE ARAGON
Departamento de Agricultura y Alimentación