

ALTERACIÓN HIDROLÓGICA DEL BARRANCO DE LERMA (ZARAGOZA) POR LA TRANSFORMACIÓN EN REGADÍO

J. CAUSAPÉ^{(1)*}, D. MERCHÁN⁽¹⁾,
R. ABRAHÃO⁽²⁾, I. GARCÍA-GARIZÁBAL⁽¹⁾

¹ Instituto Geológico y Minero de España (IGME).
C/ Manuel Lasala nº 44 9º B, 50006 Zaragoza.

² MIRARCO – Mining Innovation. Laurentian University.
935 Ramsey Lake Road, Sudbury, ON, Canada. P3E 2C6.

RESUMEN. *El regadío se expande sin un verdadero conocimiento del impacto que genera ni de su evolución en el tiempo. Este trabajo pretende analizar la alteración que supone una transformación en regadío sobre la hidrología del cauce natural receptor de sus retornos de riego. Para ello, se han cuantificado tendencias e identificado variaciones estacionales del caudal, conductividad eléctrica y concentración de nitrato del barranco de Lerma (Zaragoza) desde su condición de secano (2004) hasta que el nuevo regadío estuvo consolidado (2011). La transformación en regadío supuso un aumento de caudal (4.2 L/s-año) y concentración de nitrato (5.6 mg/L-año). La conductividad eléctrica disminuyó (-0.4 mS/cm-año), aunque la masa de sales exportada también se incrementó (232 kg/año) a causa del ascenso de caudal. La gestión del regadío unido a las características hidrogeológicas generó ciclos anuales, semanales y diarios en los parámetros analizados. Los resultados ponen de manifiesto la alteración hidrológica y su evolución en el tiempo por la puesta en regadío que debería ser tomada en cuenta para la adecuada planificación de los recursos hídricos.*

Hydrological changes in Lerma creek (Zaragoza) after the implementation of irrigation

ABSTRACT. *Irrigation expands without a real knowledge of its impacts and dynamics. This work aims to analyze changes in a natural creek's hydrology as a consequence of receiving irrigation return flows from a newly-irrigated area. To this end, trends and seasonal patterns of flow, electrical conductivity and nitrate concentration were studied in Lerma creek (Zaragoza) from unirrigated conditions (2004) until the new irrigation area was completely transformed (2011). Irrigation resulted in an increase in flow (4.2 L/s-year) and nitrate concentration (5.6 mg/L-year) values. Although electrical conductivity decreased (-0.4 mS/cm-year), the increase in flow resulted in an increase of the mass of salt exported from the*

area (232 kg/year). Irrigation management and hydro geological conditions produced annual, weekly and daily cycles of the studied variables. The results provided an insight on hydrological changes and their dynamics after implementation of irrigation, which should be taken into account for an adequate water resources management.

Palabras clave: tendencia, ciclo, caudal, salinidad, nitrato.

Key words: trends, cycles, stream water flow, salinity, nitrate.

Enviado el 27 de septiembre de 2011

Aceptado el 3 de diciembre de 2011

* Correspondencia: Instituto Geológico y Minero de España (IGME). C/ Manuel Lasala, nº 44, 9º B, 50006 Zaragoza. E-mail: j.causape@igme.es

1. Introducción

La agricultura de regadío acarrea importantes ventajas, como aumento de la productividad, diversificación de cultivos, estabilidad de cosechas o mantenimiento de la actividad económica en zonas rurales (Duncan *et al.*, 2008). Es por ello que la superficie bajo riego viene aumentando en los últimos años a un ritmo trepidante, especialmente en países en vías de desarrollo donde entre 1962 y 1998 se ha duplicado (FAO, 2003a). A nivel nacional, el incremento es más moderado pero nada despreciable ya que entre 1990 y 2009 creció un 7% (MMARM, 2010).

No obstante, el regadío también supone una importante presión sobre el medio ambiente ya que consume el 70% de los recursos hídricos a nivel mundial (FAO, 2003b). Las extracciones de agua para riego altera los regímenes hidrológicos en ríos regulados por presas (Graf, 2006) o en acuíferos sobreexplotados (Custodio, 2002) donde además de afectar a los caudales también ocasionan alteraciones en la calidad del agua (Kurunc *et al.*, 2005).

El impacto hidrológico no se limita únicamente al sistema hídrico desde el que se abastece un regadío ya que los retornos de riego ocasionan importantes alteraciones hidrológicas en los sistemas receptores de los mismos. Es por ello que organismos como la Agencia Estadounidense de Protección del Medioambiente (EPA, 1992) consideran al regadío como la principal fuente de contaminación de las aguas, particularmente por sales y nitrato entre otros contaminantes (plaguicidas, fosfatos...).

Hasta la fecha, existen algunos estudios sobre los cambios hidrológicos ocasionados por el regadío, si bien, estos estudios son a una escala tan grande que enmascara la influencia propia de los retornos de riego (CHE, 2006) o fueron realizados en regadíos una vez consolidados (García-Garizábal y Causapé, 2010; Qin *et al.*, 2011) no permitiendo obtener una perspectiva temporal de los cambios hidrológicos que sobre un sistema natural supone la transformación en regadío. En este contexto, se pretende analizar

la alteración que supone la creación de un nuevo regadío sobre la hidrología del cauce natural receptor de sus retornos de riego.

2. Área de estudio

El barranco de Lerma se localiza en la margen izquierda del valle medio del Ebro (fig. 1), concretamente a 5 km al sureste de Ejea de los Caballeros (Zaragoza). Lerma drena una cuenca hidrológica de 7.33 km², tradicionalmente dedicada a la agricultura de secano, hasta que en 2004 se proyectó la transformación en regadío de la mitad de su superficie. La progresiva puesta en riego se inició en 2006, cuando comenzó a regarse el 33% del regadío proyectado, continuando en 2007 con un 73% y 2008 con un 90%, porcentaje que se ha mantenido hasta 2010.

La cuenca de Lerma está constituida en un 34% por glacia cuaternarios de gravas con matriz arcillosa que constituyen acuíferos colgados. En ellos se desarrollan suelos con buen drenaje, baja salinidad y pequeño riesgo de erosión por lo que fueron seleccionados principalmente para su transformación en regadío (67% de su área regable). Como base impermeable de los glacia y aflorando en los valles excavados por el barranco, se encuentran lutitas y margas del terciario con niveles de calizas y yesos tabulares, lo que originó suelos con drenaje lento, salinidad elevada y pendientes que no aconsejaron su transformación en riego.

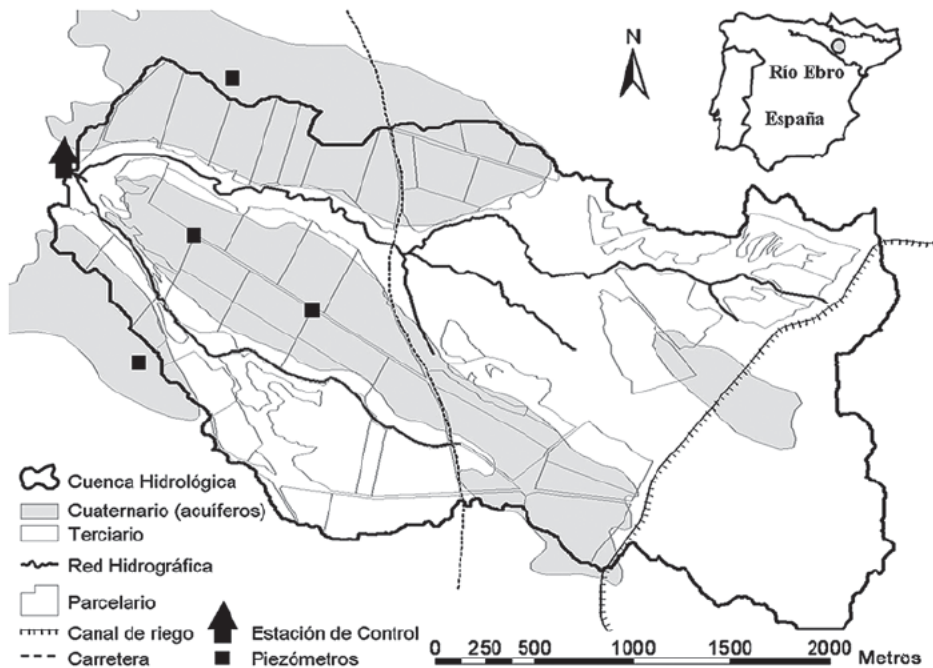


Figura 1. Marco geográfico de la cuenca de Lerma.

La precipitación media del periodo de estudio (años hidrológicos del periodo 2004-2010), según las estaciones agroclimáticas más cercanas de la red SIAR (Servicio Integral de Asesoramiento al Regante, <http://oficinaregante.aragon.es>), fue de 401 mm con máximos en primavera y otoño. En condiciones de secano se registró un año muy húmedo (2004: 632 mm), y otro muy seco (2005: 227 mm), mientras que en condiciones de regadío (periodo 2006-2010) las pluviometrías anuales se aproximaron más a las de un año medio (entre 350 mm/año y 444 mm/año). La evapotranspiración de referencia (ET_0) media del periodo de estudio fue de 1297 mm lo que para una agricultura productiva hizo imprescindible el riego, principalmente en verano cuando la ET_0 fue máxima.

La agricultura es la típica del valle medio del Ebro en la que se desarrollan cultivos extensivos entre los que se incluye el maíz (45%), cereal de invierno (20%), hortalizas (14%), guisante (10%), girasol (7%), hierba (2%) y almendros (1%).

El sistema de riego implantado fue el riego a presión (86% aspersión-14% goteo) con aguas de buena calidad ($CE = 0.35$ mS/cm) procedentes del pantano de Yesa (Río Aragón). La red de riego fue diseñada para que se pudiera regar a la vez el 80% de la superficie lo que permitió una gran flexibilidad a la hora de confeccionar calendarios de riego. En cuanto a la fertilización nitrogenada, las mayores aplicaciones se realizaron en el abonado de cobertera del maíz (mes de julio) utilizándose mayoritariamente el fertirriego con N-32 (comunicación personal, comunidad de regantes).

3. Metodología

3.1. Seguimiento del barranco de Lerma

Se efectuó el seguimiento del barranco de Lerma desde el inicio de la transformación de su cuenca (octubre-2003, dos años antes de comenzar a regarse) hasta septiembre de 2010. Entre octubre-2003 y septiembre-2005 se efectuaron muestreos de agua manuales con una frecuencia mensual. En octubre-2005 se instaló una estación de aforos equipada con un limnógrafo electrónico (Thalimedes, OTT) y un tomamuestras automático de agua (ISCO 3700) que permitió obtener información diaria.

Los datos de nivel registrados por el limnógrafo (h) fueron transformados a caudal (Q) por la curva de gasto del aforador obtenida con WinFlume (Whal, 2000) y comprobada con diversos métodos de aforo (molinete, vertedero en V y aforos químicos).

$$Q \text{ [m}^3\text{/s]} = 1.73 \cdot (h \text{ [m]} + 0.00347)^{1.624} \quad \text{para } h \leq 0.5 \text{ m}$$

$$Q \text{ [m}^3\text{/s]} = 10.28 \cdot (h \text{ [m]} + 0.01125)^{1.725} \quad \text{para } h > 0.5 \text{ m}$$

El caudal del barranco, durante el período inicial sin estación de aforos, fue estimado a partir del coeficiente de escorrentía (0.087) obtenido en la cuenca de Lerma mediante la relación lluvia-caudal del periodo anterior a la implantación del riego y existencia de la estación de aforos (de 1 de octubre de 2005 a 31 de marzo de 2006).

Las muestras colectadas manualmente o por el tomamuestras automático fueron trasladadas a laboratorio donde se determinó su conductividad eléctrica a 25°C (CE) con un conductivímetro Orion-5 Star y sonda DuraProbe, y la concentración de nitrato (NO_3^-) con el equipo AutoAnalyzer 3 por colorimetría (APHA, 2005). Una estimación de las sales exportadas por el barranco de Lerma pudo realizarse a través de la relación de la conductividad con los Sólidos Totales Disueltos (SDT) encontrada por Abrahão (2010) en las aguas del barranco de Lerma.

$$\text{SDT (mg/l)} = 712.22 \cdot \text{CE (mS/cm)} - 104.83$$

En julio de 2011 la estación de aforos estuvo equipada con sensores de medición en continuo y teledatada programados con una frecuencia diezminutal. Adicionalmente en este mes, al objeto de conocer la conductividad eléctrica y concentración de nitratos del agua subterránea se analizaron cuatro muestras recogidas en otros tantos piezómetros repartidos por los acuíferos de la zona (fig. 1).

Los datos recopilados hasta 2010 han sido utilizados en este artículo para analizar la tendencia hidrológica del barranco de Lerma por efecto del riego así como para la identificación y cuantificación de la variación estacional asociada al regadío. Los datos obtenidos en julio de 2011 han sido utilizados para identificar ciclos semanales y diarios inducidos por el regadío.

3.2. Tendencias

Para determinar si los cambios ocurridos en las variables estudiadas fueron significativos es necesario aplicar pruebas estadísticas que identifiquen la existencia de tendencias, y cuantifiquen las mismas. Los datos relativos a las variables hidrológicas tienen una serie de particularidades que es necesario conocer y tener en cuenta si se quiere obtener una adecuada comprensión del sistema bajo estudio (Helsel y Hirsch, 2002). Entre otras, la asimetría de la distribución estadística de los datos y la estacionalidad tienen especial importancia en la determinación de tendencias en variables hidrológicas.

Los eventos de lluvia ocasionan una asimetría estadística que puede afectar a la representabilidad del dato, especialmente, si como es nuestro caso, intentamos analizar el efecto del riego con la menor influencia de las lluvias ya que un evento de precipitación puede generar puntualmente una escorrentía similar a la totalizada el resto del mes. Para confeccionar series temporales mensuales (frecuencia mínima de muestreo) de los parámetros analizados (caudal, conductividad eléctrica y concentración de nitrato) sobre la que analizar las tendencias, en aquellos meses con varios datos la influencia de la asimetría estadística se ha moderado usando medianas en lugar de medias aritméticas como dato representativo del mes que estamos tratando (fig. 2).

Las series temporales mensuales fueron sometidas a varios test de normalidad (Chi-cuadrado, Shapiro-Wilks; Statgraphics) que arrojaron una no-normalidad lo que implicó la necesidad del uso de pruebas estadísticas no paramétricas, especialmente recomendadas para análisis de series de varias variables frente a la conversión en series normales y el uso de pruebas paramétricas (Helsel y Hirsch, 2002).

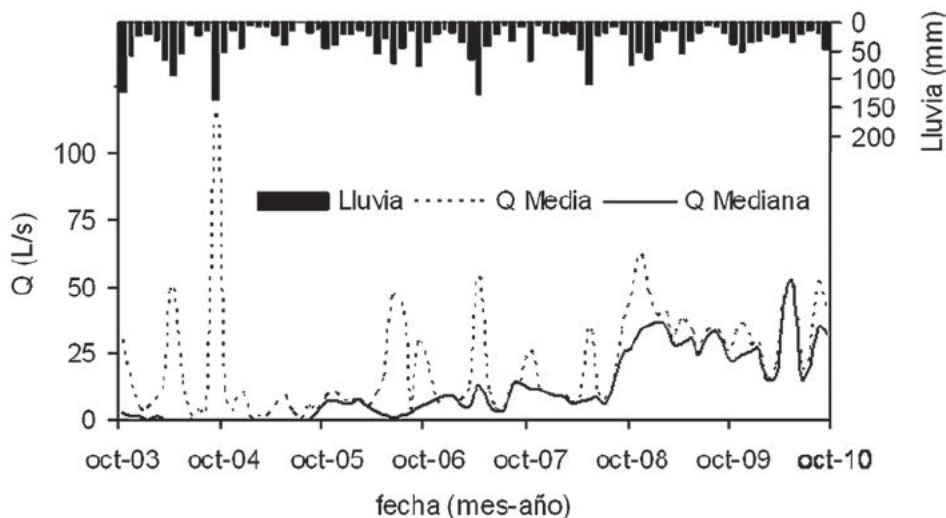


Figura 2. Precipitación, media y medianas mensuales del caudal registrado en el barranco de Lerma durante el periodo de estudio (2004-2010).

La variabilidad a lo largo del año puede enmascarar las tendencias por lo que se utilizó la prueba estacional de Kendall (Helsel y Hirsch, 2002) que tiene en cuenta la estacionalidad inducida por el riego. La prueba estacional de Kendall es una prueba no paramétrica que calcula para cada estación que consideremos (en nuestro caso, meses) y para toda la serie de datos (7 años hidrológicos) el valor del estadístico τ de Kendall, coeficiente de correlación no paramétrico indicativo de la existencia de tendencia. En caso de que no exista tendencia, τ será próxima a cero. Si por el contrario existe una tendencia perfecta el valor de τ será de uno o menos uno según si cada valor es sucesivamente mayor o menor al anterior a lo largo del tiempo. La cuantificación de la tendencia se obtuvo mediante la mediana de la pendiente entre cada par de datos, denominada pendiente de Sen (Sen, 1968).

3.3. Ciclos

La influencia de la dinámica del riego en el barranco de Lerma también fue analizada identificando la posible existencia de ciclos anuales, semanales y diarios en caudal, conductividad eléctrica y concentración de nitrato. La identificación de ciclos anuales se realizó a partir de las medianas de datos diarios por trimestres una vez que el regadío estuvo ya consolidado (2008-2010).

Para la identificación de los ciclos semanales y diarios se seleccionaron los datos de julio de 2011, mes de máximo riego y fertilización nitrogenada en el que se disponía de datos con resolución diezminutal. Los ciclos semanales se identificaron a partir de las medianas de los diferentes días de la semana (lunes a domingo), y los ciclos diarios se identificaron a partir de las medianas de las 24 horas del día.

4. Resultados y Discusión

4.1. Tendencias

La prueba estacional de Kendall detectó en el caudal tendencias positivas para cada uno de los meses, con una mayor significancia estadística en los meses de primavera y verano (tabla 1). Estas tendencias fueron siempre crecientes y su cuantificación varió entre 2.4 y 7.2 L/s·año alcanzando los valores más altos en los meses de mayor riego, tanto del cereal de invierno (abril-mayo) como del maíz (agosto). La progresiva transformación en regadío incrementó de manera continuada el caudal (fig. 3) a causa de la incorporación al barranco de los retornos del riego.

La conductividad eléctrica presentó una tendencia con un marcado carácter estacional. Los resultados del contraste fueron significativos para los meses de abril a septiembre (temporada de riego), con mayor significancia estadística en los meses centrales de este periodo. No obstante, en todos los meses los valores del estadístico τ fueron negativos y considerando el año en su conjunto existió una clara tendencia significativa ($p < 0.01$).

Al contrario que para el caudal, la tendencia de la conductividad eléctrica fue negativa con un rango de valores que osciló entre -0.3 y -0.8 mS/cm·año. La tendencia decreciente pudo deberse en primera instancia a la dilución de la salinidad natural del terreno con los retornos del riego, tal y como demuestran los mayores descensos registrados durante el mes de agosto (mes con mayor riego, fig. 3). Una vez que se consolidó el regadío manteniendo la superficie regada, pudo tener una mayor relevancia el progresivo lavado de las sales en los suelos bajo riego que ocasionó el continuado descenso de la salinidad del barranco (fig. 3).

En cuanto al nitrato, sólo presentó tres meses con tendencias significativas (diciembre, agosto y septiembre). Si bien, todos los valores del estadístico τ , aún para los meses donde la tendencia no fue significativa, apuntaron en la misma dirección, en este caso, valores mayores en los últimos años de la serie temporal. Con ello, el resultado de la prueba a nivel anual teniendo en cuenta la estacionalidad de los datos detectó una tendencia claramente significativa ($p < 0.01$).

La evolución de la concentración de nitrato (fig. 3) muestra como las lluvias de 2006 pudieron lixiviar el nitrato acumulado en los suelos y aplicado en condiciones de secano previas a la transformación en riego. La sequía de 2005 permitió una mayor concentración del drenaje con concentraciones de nitrato del orden a las registradas con el regadío ya consolidado. Una vez lixiviado el nitrato almacenado en los suelos en condiciones de secano, la transformación en regadío se inició en 2006 con valores mínimos de concentración de nitrato en el barranco, no obstante, el progresivo aumento en la aplicación de fertilizantes asociado a la puesta en riego produjo un continuo incremento en la concentración de nitrato. Una vez consolidado el regadío (año 2008), la serie temporal parece indicar que la concentración de nitrato se fue estabilizando con la variabilidad propia de la estacionalidad del riego, fertilización y climatología.

Tabla 1. Estadístico τ de Kendall, probabilidad crítica (p) y cuantificación de la tendencia del caudal (Q), conductividad eléctrica (CE) y concentración de nitrato (NO_3^-) para cada mes del año y anualmente teniendo en cuenta la estacionalidad de los datos recopilados en siete años hidrológicos (periodo 2004-2010).

| | | Q | CE | NO_3^- | |
|--------------|-----------|-------------|-----------------|-----------------|--------------|
| INTERMENSUAL | Octubre | τ | 0.7143 | - 0.0476 | 0.3333 |
| | | p | 0.0243** | 0.8806 ns | 0.2931 ns |
| | | m | 3.9 L/s·año | - | - |
| | Noviembre | τ | 0.8095 | - 0.4286 | 0.3333 |
| | | p | 0.0107** | 0.1765 ns | 0.2931 ns |
| | | m | 4.2 L/s·año | - | - |
| | Diciembre | τ | 0.8095 | - 0.4286 | 0.5238 |
| | | p | 0.0107** | 0.1765 ns | 0.0985* |
| | | m | 4.5 L/s·año | - | 5.7 mg/L·año |
| | Enero | τ | 0.7807 | - 0.3333 | 0.1429 |
| | | p | 0.0163** | 0.2931 ns | 0.6523 ns |
| | | m | 4.4 L/s·año | - | - |
| | Febrero | τ | 0.7143 | - 0.3333 | 0.4286 |
| | | p | 0.0243** | 0.2931 ns | 0.1765 ns |
| m | | 2.9 L/s·año | - | - | |
| Marzo | τ | 0.8783 | - 0.5238 | 0.4286 | |
| | p | 0.0069*** | 0.0965 ns | 0.1765 ns | |
| | m | 2.9 L/s·año | - | - | |
| Abril | τ | 0.8783 | - 0.619 | 0.3333 | |
| | p | 0.0069*** | 0.0509* | 0.2931 ns | |
| | m | 7.2 L/s·año | - 0.3 mS/cm·año | - | |
| Mayo | τ | 0.9759 | -0.8095 | 0.0476 | |
| | p | 0.0027*** | 0.0107** | 0.8806 ns | |
| | m | 6.2 L/s·año | - 0.6 mS/cm·año | - | |
| Junio | τ | 0.8783 | 0.7143 | 0.4880 | |
| | p | 0.0069*** | 0.0243** | 0.1331 ns | |
| | m | 3.2 L/s·año | - 0.5 mS/cm·año | - | |
| Julio | τ | 0.8783 | -0.8095 | 0.4286 | |
| | p | 0.0069*** | 0.0107** | 0.1765 ns | |
| | m | 2.4 L/s·año | - 0.6 mS/cm·año | - | |
| Agosto | τ | 0.7807 | -0.8095 | 0.5238 | |
| | p | 0.0163** | 0.0107** | 0.0985* | |
| | m | 6.7 L/s·año | - 0.8 mS/cm·año | 5.6 mg/L·año | |
| Septiembre | τ | 1.0000 | -0.5238 | 0.5855 | |
| | p | 0.0000*** | 0.0985* | 0.0715* | |
| | m | 4.2 L/s·año | - 0.5 mS/cm·año | 3.6 mg/L·año | |
| ANUAL | τ | 0.8415 | - 0.4127 | 0.3593 | |
| | p | 0.0000*** | 0.0000*** | 0.0000*** | |
| | m | 4.2 L/s·año | - 0.4 mS/cm·año | 5.6 mg/L·año | |

Significativo a un nivel de confianza del 10% (*), 5% (**), y 1% (***); ns: no significativo.

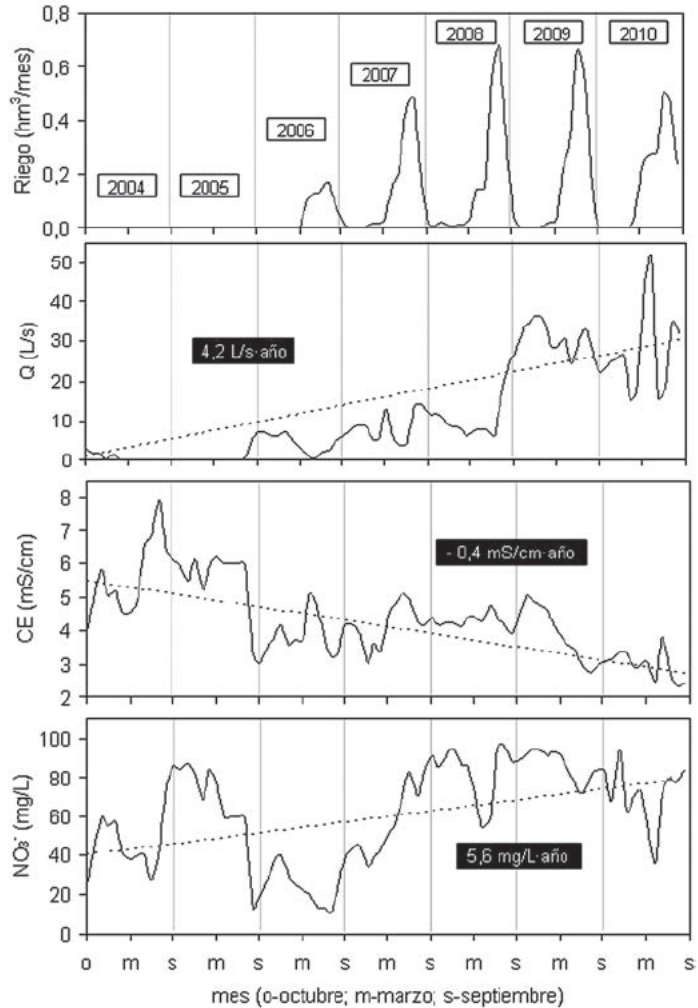


Figura 3. Evolución mensual del riego aplicado en la cuenca del Lerma así como de las medianas del caudal (Q), conductividad eléctrica (CE) y concentración de nitrato (NO_3^-) en el barranco de Lerma durante los años hidrológicos comprendidos entre 2004 y 2010. Tendencias detectadas durante el periodo de estudio.

Así pues, la prueba estacional de Kendall cuantificó durante los siete años hidrológicos de estudio una tendencia de $4.2 \text{ L/s}\cdot\text{año}$ en el caudal, $-0.4 \text{ mS/cm}\cdot\text{año}$ en la conductividad eléctrica y $5.6 \text{ mg/L}\cdot\text{año}$ en la concentración de nitratos indicativos del efecto que ha supuesto la transformación en riego para la hidrología del barranco de Lerma. No obstante, aunque la salinidad del barranco disminuyó, la masa de sales exportada por el barranco de Lerma se incrementó 232 kg/año a consecuencia del aumento del caudal.

Las tendencias del caudal y conductividad eléctrica fueron contrarias a las detectadas por CHE (2006) en la mayoría de las estaciones de aforo de la cuenca del Ebro durante el periodo 1961-2004 ya que en este trabajo se cuantificó un descenso de los caudales y una salinización de las aguas, principalmente en las estaciones del tramo

final de los ríos. Las tendencias detectadas en el Ebro también fueron justificadas por la implantación de regadíos pero a diferencia del barranco de Lerma donde sólo se contempla el efecto de la incorporación de los retornos de riego, a escala de la cuenca del Ebro tiene gran importancia el efecto detractor de agua para abastecer a regadíos y otros usos, lo cual ocasiona que el volumen de agua en los ríos para diluir los retornos de riego sea menor, disminuyendo el caudal y aumentando la salinidad.

En el caso del nitrato, las tendencias detectadas en el Ebro también fueron crecientes, si bien, sus cuantificaciones fueron mucho más bajas (0.21 mg/L·año, Ebro en Zaragoza) a las detectadas en Lerma (5.6 mg/L·año) donde la escorrentía se debió mayoritariamente a los retornos de riego.

4.2. Ciclos

Ciclo anual. La representación trimestral de los datos (fig. 4) indica la presencia de un ciclo anual en el caudal asociado a la estacionalidad de los volúmenes de riego aplicados. Así pues, el ciclo se inició con valores mínimos en invierno que se incrementaron durante la primavera hasta alcanzar los mayores caudales en verano cuando el riego aplicado también fue máximo. Es destacable que en otoño, cuando el riego fue prácticamente nulo, el barranco todavía presentó un caudal importante poniendo de manifiesto el desfase riego-drenaje asociado al papel amortiguador de la escorrentía ejercido por los acuíferos.

El ciclo en la salinidad fue inverso al del caudal ya que ascensos de caudal se correspondieron con descensos en la conductividad eléctrica de manera que los valores mínimos se registraron en primavera-verano y los máximos en otoño-invierno.

En cuanto al nitrato, siguió un ciclo similar, salvo que en verano, al contrario que para la conductividad eléctrica, las concentraciones se incrementaron por efecto de la fertilización nitrogenada aplicada en estas fechas.

La relación inversa del caudal con la conductividad y nitrato ya fue detectada en otras zonas con aguas de riego de buena calidad (Causapé *et al.*, 2004; Isidoro *et al.*, 2006; García-Garizabal *et al.*, 2011). Dichos trabajos también detectaron una relación menor para el nitrato ya que a la variabilidad impuesta por el manejo del riego se unió la variabilidad asociada al manejo de la fertilización nitrogenada.

Ciclo semanal. La representación de las medianas de los datos diarios durante julio de 2011 detectó ciclos semanales (fig. 5). Se registró un aumento de caudal durante el fin de semana que es cuando se intensificó el riego aprovechando tarifas eléctricas más baratas (comunicación personal, comunidad de regantes). Así pues, los caudales aumentaron a partir del viernes e incluso ascendieron hasta el martes como efecto de la regulación del drenaje. La rápida escorrentía superficial del mayor riego aplicado durante el fin de semana provocó inicialmente una dilución de la salinidad del barranco pero desde el sábado el drenaje sub-superficial de las zonas próximas al cauce (materiales terciarios) incrementó la conductividad. A partir del martes tuvo una mayor influencia la esco-

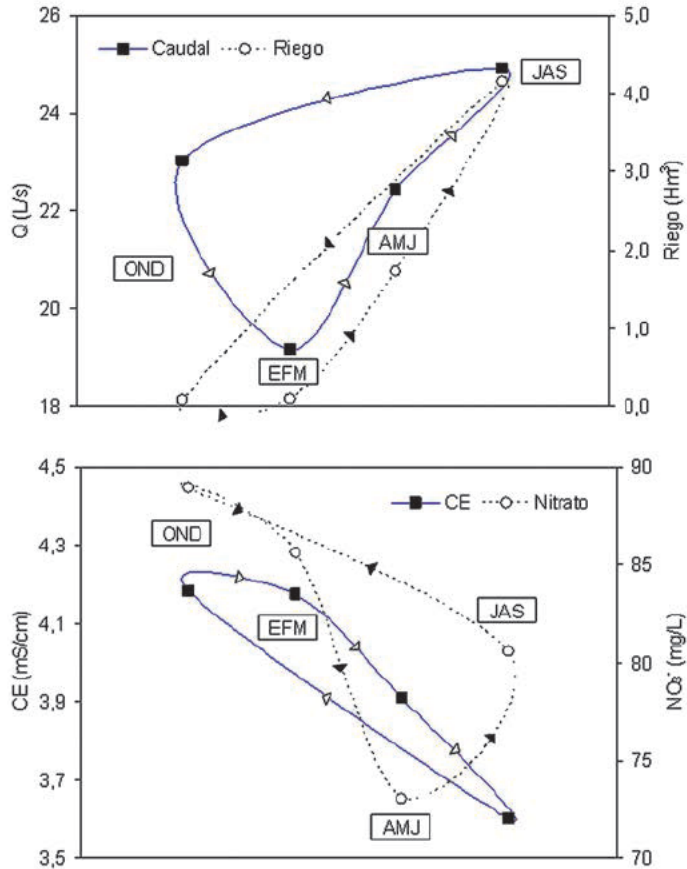


Figura 4. Ciclo anual (OND: Octubre-Diciembre; EFM: Enero-Marzo; AMJ: Abril-Junio; JAS: Julio-Septiembre) del riego, caudal, (Q), conductividad eléctrica (CE) y concentración de nitrato (NO_3^-) del regadío de Lerma una vez consolidado (años hidrológicos 2008-2010).

rentía subterránea procedente de las zonas más alejadas (parte central de los glaciares con una CE media de los piezómetros muestreados de 1.62 mS/cm) lo que provocó un descenso en la salinidad del barranco. El predominio de la escorrentía subterránea (miércoles, jueves y viernes con NO_3^- media de los piezómetros muestreados de 121 mg/L) incrementó la concentración de nitrato del barranco que se mantuvo elevada durante el fin de semana debido al ferti-riego que los agricultores a tiempo parcial aprovecharon a realizar principalmente durante el fin de semana.

Ciclo diario. La representación de las medianas de los datos horarios durante julio de 2011 detectó ciclos diarios (fig. 6). El caudal comenzó a ascender a partir de las ocho de la tarde (18:00 horas GMT +0:00) para continuar creciendo hasta media noche. Desde la media noche hasta el medio día permaneció más o menos estable y entonces decreció para terminar cerrando el ciclo. La evolución del caudal estuvo directamente relacionada con el manejo del riego ya que la comunidad de regantes ofrece la posibilidad de comenzar a regar a las 8 de la mañana u 8 de la tarde, y entre estas dos opciones los agricultores programan sus autómatas para comenzar a regar mayoritariamente a las 8 de la

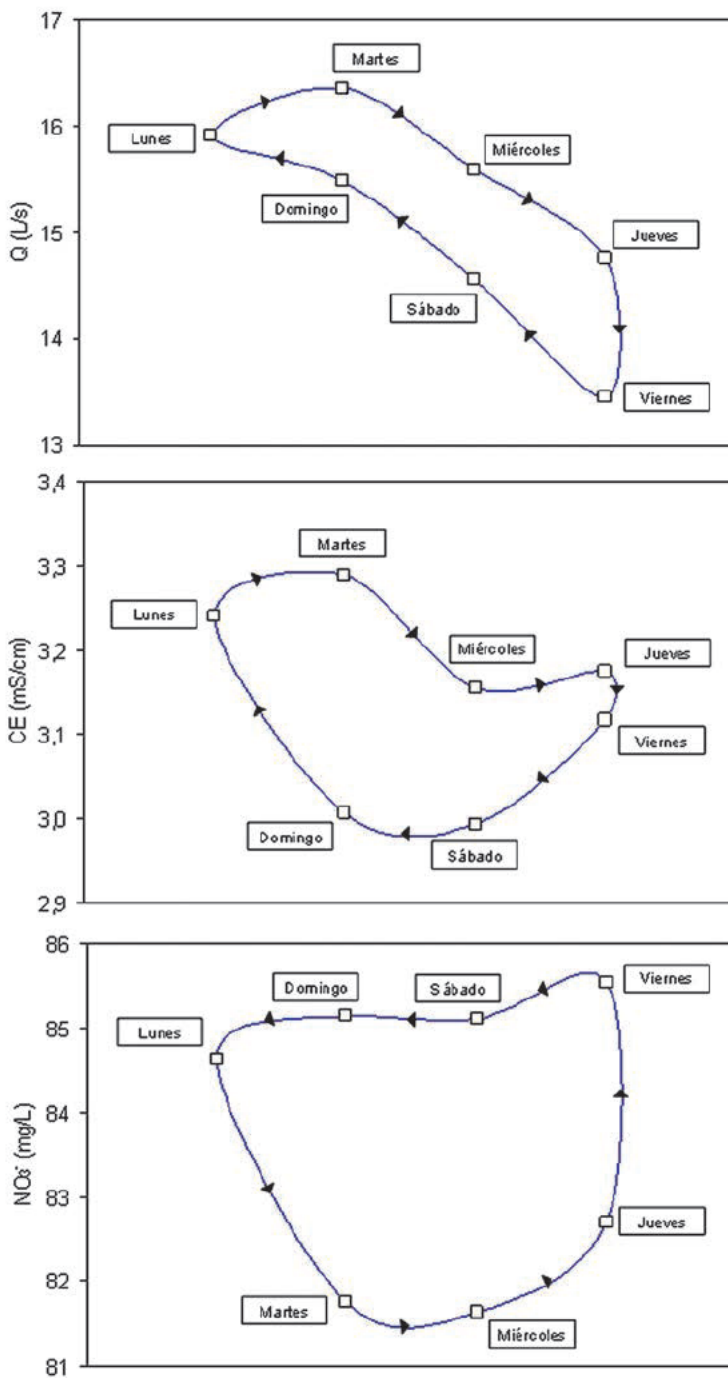


Figura 5. Ciclo semanal del caudal (Q), conductividad eléctrica (CE) y concentración de nitrato (NO_3^-) del barranco de Lerma en julio de 2011.

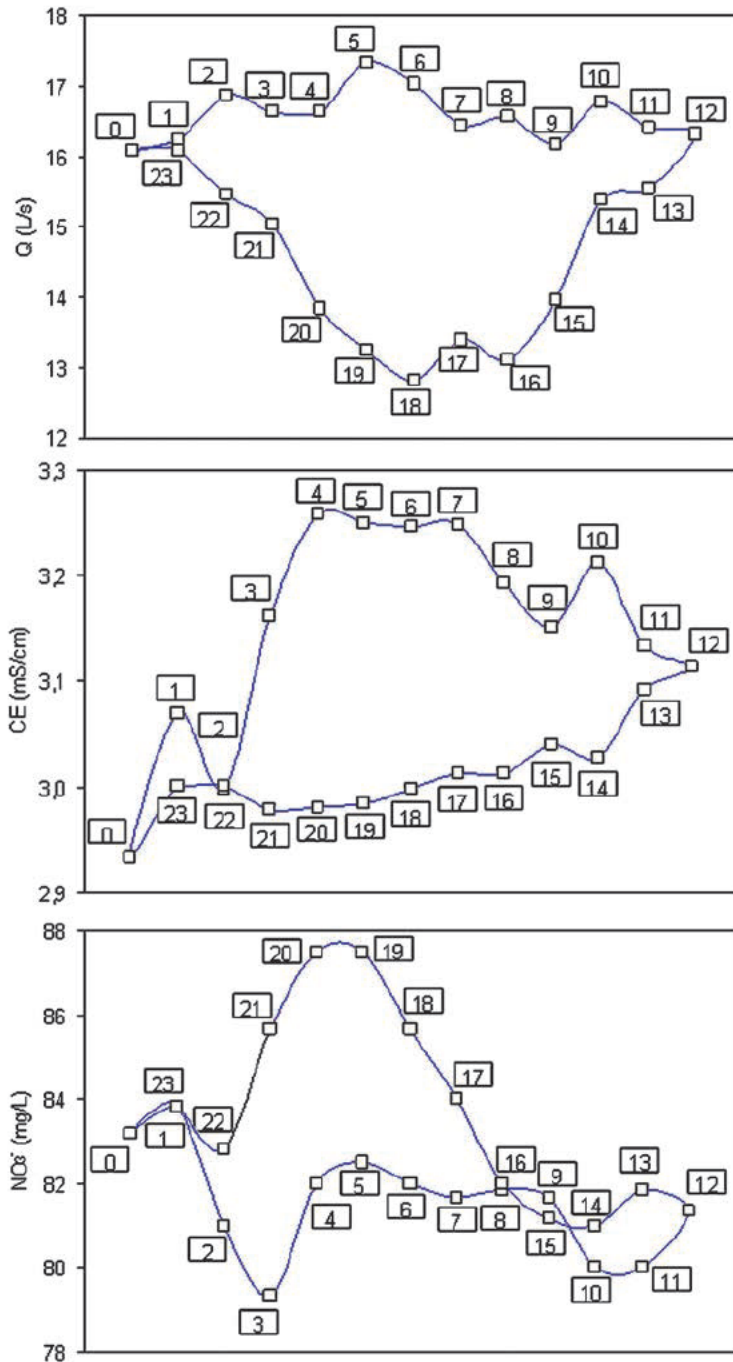


Figura 6. Ciclo diario (horas en GMT +0:00) del caudal (Q), conductividad eléctrica (CE) y concentración de nitrato (NO₃⁻) del barranco de Lerma en julio de 2011.

tarde (18:00 horas GMT +0:00) coincidiendo con el momento en que se incrementó el caudal del barranco. El predominio del riego nocturno sobre el diurno (menor viento, temperatura y humedad relativa) estuvo justificado en minimizar las pérdidas por evaporación y arrastre del riego por aspersión que en el centro del valle del Ebro alcanza valores medios del 15% del riego aplicado (Playán *et al.*, 2005).

Seis horas después del comienzo del ascenso del caudal comenzó a ascender la salinidad a consecuencia de la llegada del drenaje sub-superficial de las zonas salinas más próximas al cauce. Cuatro horas después comenzó un descenso progresivo de la conductividad por la mayor influencia de la escorrentía subterránea procedente de las zonas más alejadas (parte central de los glacis) con un menor contenido en sales (CE_{media} del agua subterránea de 1.62 mS/cm). En el caso del nitrato, el ciclo también estuvo influenciado por el manejo de la fertilización ya que para un mayor control del correcto funcionamiento de los equipos, el ferti-riego fue aplicado durante el día. Tras una primera aplicación de agua sola se efectúa el ferti-riego (comunicación personal comunidad de regantes) coincidiendo su aplicación con el ascenso a primera hora de la tarde de la concentración de nitrato en el barranco.

La existencia de ciclos diarios ya fue detectada por Isidoro *et al.*, (2003) en otro regadío de la cuenca del Ebro, si bien, en este caso se trató de un regadío por inundación y los ciclos se asociaron a diluciones por pérdidas operacionales en colas de acequia que principalmente ocurrían por la noche. En el caso de Lerma, los ciclos diarios estuvieron asociados tanto al manejo del riego-fertilización como a las características hidrogeológicas del área y la influencia de los distintos componentes de la escorrentía.

5. Conclusiones

La transformación en regadío supuso: i) un aumento del caudal del barranco de Lerma de 4.2 L/s·año, detectado tanto en los meses individuales como en el año en su conjunto, ii) una disminución de la salinidad de -0.4 mS/cm·año, fundamentalmente en los meses de primavera y verano, y iii) un incremento en la concentración de nitratos de 5.6 mg/L·año. Frente a los ascensos esperados del caudal y concentración de nitrato, que supuso una afección medioambiental negativa, puede llegar a sorprender el descenso de la salinidad que supuso una afección positiva para el barranco de Lerma, pero no para su sistema receptor que recibió una mayor masa de sales (232 kg/año).

El regadío no sólo ha variado el caudal y la calidad de las aguas del barranco según las tendencias detectadas sino que también la propia gestión del riego y la fertilización, unido a las características hidrogeológicas del área de estudio provocó la existencia de ciclos anuales, semanales y diarios en el caudal, salinidad y concentración de nitrato del barranco de Lerma.

En definitiva, los resultados de este estudio han puesto de manifiesto la alteración hidrológica que los cauces naturales sufren por acciones de origen antrópico y que debe ser tenida en cuenta para una adecuada planificación de los recursos hídricos. En el caso

concreto del barranco de Lerma se ha cuantificado la influencia de la transformación en regadío, si bien, será interesante poder disponer de series temporales más largas para analizar la evolución hidrológica del barranco a medio y largo plazo.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias al proyecto CGL2009-13410-C02-01 (MICINN) y su beca de formación de personal investigador (BES2010 034124). Un especial agradecimiento a los regantes por su apoyo y colaboración.

Referencias bibliográficas

- ABRAHAO, R. (2010). *Impactos ambientales del riego: La transformación de la cuenca de Lerma (Zaragoza, España)*. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente. Universidad de Zaragoza. 143 pp.
- CAUSAPÉ, J., QUÍLEZ, D., ATAGÜÉS, R. (2004). Assessment of irrigation and environmental quality at the hydrological basin level II. Salt and nitrate loads in irrigation return flows. *Agricultural Water Management*, 70: 211-228.
- CHE (2006). *Control de los retornos de las actividades agrarias de la cuenca del Ebro: evaluación de las tendencias de la calidad del agua, control experimental de los retornos y propuesta de red de control*. Informe interno, 284 pp. Disponible en: www.chebro.es [9 de septiembre de 2011].
- CUSTODIO, E. (2002). Aquifer overexploitation: What does it mean? *Hydrogeology Journal*, 10: 254-277.
- DUNCAN, R. A., BETHUNE, M. G., THAYALAKUMARAN, T., CHRISTEN, E. W., MCMAHON, T. A. (2008). Management of salt mobilisation in the irrigated landscape. A review of selected irrigation regions. *Journal of Hydrology*, 351: 238-252.
- EPA (1992). *Managing nonpoint source pollution*. United States Environmental Protection Agency. Office of Water. Washington, D. C., January.
- FAO (2003a). *World agriculture: towards 2015/2030*. Earthscan Publications Ltd, 432 pp., London.
- FAO (2003b). *Unlocking the water potential of agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 70 pp., Roma.
- GARCÍA-GARIZÁBAL, I., CAUSAPÉ, J. (2010). Influence of irrigation water management on the quantity and quality of irrigation return flows. *Journal of Hydrology*, 385: 36-43.

- GARCÍA-GARIZÁBAL, I., CAUSAPÉ, J., ABRAHAO, R. (2011). Application of the Irrigation Land Environmental Evaluation Tool for flood irrigation management and evaluation of water use. *Catena*, 87: 260-267.
- GRAF, W. L. (2006). Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers. *Geomorphology*, 79: 336-360.
- HELSEL, D. R., HIRSCH, R. M. (2002). *Statistical methods in water resources*. Techniques of Water Resources Investigations, Book 4, Chapter A3, US Geological Survey, 510 pp., Reston, VA.
- ISIDORO, D., QUÍLEZ, D., ARAGÜÉS, R. (2003). Sampling strategies for the estimation of salt and nitrate loads in irrigation return flows: La Violada Gully (Spain) as a case study. *Journal of Hydrology*, 271: 39-51.
- ISIDORO, D., QUÍLEZ, D., ARAGÜÉS, R. (2006). Environmental Impact of Irrigation in La Violada District (Spain): I. Salt Export Patterns. *Journal of Environmental Quality*, 35: 766-775.
- KURUNC, A., YUREKLI, K., OKMAN, C. (2006). Effects of Kilickaya Dam on concentration and load values of water quality constituents in Kelkit Stream in Turkey. *Journal of Hydrology*, 317: 17-30.
- MMARM (2010). *ESYRCE: Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos*. Informe de los regadíos en España. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MMARM). Secretaría General Técnica. Subsecretaría, 30 pp., Madrid.
- PLAYÁN, E., SALVADOR, R., FACI, J. M., ZAPATA, N., MARTÍNEZ-COB, A., SÁNCHEZ, I. (2005). Day and night wind drift and evaporation losses in sprinkler solid-sets and moning laterals. *Agricultural Water Management*, 76 (3): 139-159.
- QIN, D., QIAN, Y., HAN, L., WANG, Z., LI, C., ZHAO, Z. (2011). Assessing impact of irrigation water on groundwater recharge and quality in arid environments using CFCs, tritium and stable isotopes, in the Zhangye Basin, Northwest China. *Journal of Hydrology*, 405: 194-208.
- SEN, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63: 1379-1389.
- WHAL, T. (2000). *Winflume user's manual*. Software para el diseño y calibración de aforadores de garganta larga y vertederos de cresta ancha para medición de descargas en canales abiertos. 49 pp., United States Department of the Interior.