

# VALIDACION DE UN MODELO HIDROSALINO DE AGUAS DE RETORNO DE RIEGO (CIRFLE) CON SERIES DE LOS AÑOS 1980, 1990 Y 2000

Barros, R.<sup>1</sup>, Isidoro, D.<sup>1</sup>, Quílez, D.<sup>1</sup>, Aragüés, R.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA-DGA), Unidad de Suelos y Riegos (asociada al CSIC), Apdo. 727, 50080 Zaragoza, [rbarros@aragon.es](mailto:rbarros@aragon.es)

## Resumen

Los modelos hidrosalinos permiten predecir el volumen de agua, la concentración y la masa de sales en los retornos de riego, y analizar las prácticas más eficientes para el control de la contaminación salina inducida por la agricultura de regadío. El modelo conceptual hidrosalino CIRFLE se calibró en los años 80 en la zona regable de La Violada (cuena media del Ebro). Ajustando el parámetro eficiencia de aplicación del riego ( $E_{iae} = 0.916$ ), se obtuvieron errores de estimación en las masas de sales exportadas en los retornos del riego inferiores al 2% (año 1982, calibración) y 12% (años 1983 y 1984, validación). La continuación de los trabajos en La Violada en los años 90 (1995-1998) y 00 (2006-2008) permitió mejorar las estimas de evapotranspiración real de los cultivos incorporando el efecto del estrés hídrico, y considerar las aportaciones directas y las filtraciones de agua desde los canales de riego a la red de desagües. La aplicación de estas variables de entrada a CIRFLE condujo a unos errores medios de estimación del 4% (años 90) y 7% (años 00) para el volumen de agua y del 6% y 11% (años 90) y 0% y 7% (años 00) para la concentración y masa de sales, respectivamente, en los retornos de riego. Estos bajos errores de estimación indican que CIRFLE es un modelo útil y sencillo como herramienta de predicción y control de la contaminación salina inducida por regadíos, con características similares a las del polígono de riego de La Violada.

## 1.- Introducción y objetivos

Las aguas de drenaje, por su elevada salinidad y contenido en nutrientes, pueden producir un impacto medioambiental negativo sobre las masas de agua (superficiales o subterráneas) que las reciben, condicionando la calidad de las aguas de esos ríos y acuíferos para el uso agrícola, industrial, urbano y ecológico (Thayalakumaran et al., 2007). En Europa, la Directiva Marco del Agua (DMA; UE, 2000) establece una normativa para la protección y gestión de las aguas con el fin de prevenir y reducir la contaminación. En la cuena del río Ebro, la agricultura de regadío, con casi 0.8 millones de ha, es el mayor consumidor de agua, con una demanda media de 6310 hm<sup>3</sup>/año (CHE, 1996). Las características geológicas de la cuena y el manejo ineficiente de los insumos de producción provocan en algunas zonas regables unas aguas de retorno de riego (ARR) con concentraciones elevadas de sales y otros contaminantes (Isidoro y Aragüés, 2007). Estas ARR pueden afectar negativamente a la calidad de las masas de agua receptoras de las mismas, por lo que es necesario disponer de herramientas para cuantificar la masa de sales en las ARR, predecir sus cambios bajo diferentes escenarios y diseñar estrategias eficientes de control.

Los modelos de simulación son una herramienta adecuada para evaluar la salinidad de las ARR bajo distintas condiciones o escenarios de manejo del riego (Aragüés et al., 1985). El modelo conceptual hidrosalino CIRFLE (Quílez, 1998) permite estimar el volumen, la salinidad y la masa de sales exportada por las aguas de retorno de riego (ARR) de una zona regada.

La zona regable de La Violada, situada en la cuenca media del valle del Ebro, es representativa de otras muchas zonas de regadío tradicionales, regadas por inundación, con bajas eficiencias de riego y con un alto contenido de yeso en el suelo. Además, ha sido estudiada durante las décadas de 1980, 1990 y 2000 (Isidoro et al., 2008) por lo que se dispone de una buena base de datos históricos de las masas de sales exportadas por esta zona regable. El modelo CIRF (CIRFLE sin la consideración de la eficiencia en el lavado de sales) se calibró y validó en los años 80 en esta zona con resultados aceptables teniendo en cuenta las simplificaciones del modelo (Quílez et al., 1987).

Los objetivos de este estudio son (i) incluir nuevas estimaciones de la evapotranspiración de los cultivos ( $Q_{et}$ ), los contenidos de agua inicial y final en el suelo ( $Q_{isw}$ ,  $Q_{fsw}$ ), de los aportes directos de los canales (AC) y de las filtraciones de los canales (FC) no consideradas previamente, y (ii) validar CIRFLE con datos de los años 90 (1995-1997) y 00 (2006-2008) usando las nuevas estimaciones de estas variables de entrada ( $Q_{et}$ , AC,  $Q_{isw}$ ,  $Q_{fsw}$  y FC).

## 2.- Descripción de la zona de estudio

La zona regable de La Violada, situada dentro de la cuenca del Barranco de la Violada tiene una superficie de 5282 ha, de las que aproximadamente 4000 ha están bajo riego. Se encuentra situada en el sistema regable de Monegros I (Huesca) y está limitada por el canal de Monegros al Nordeste, la acequia de la Violada al Oeste y la acequia de Santa Quiteria al Sur (Figura 1).

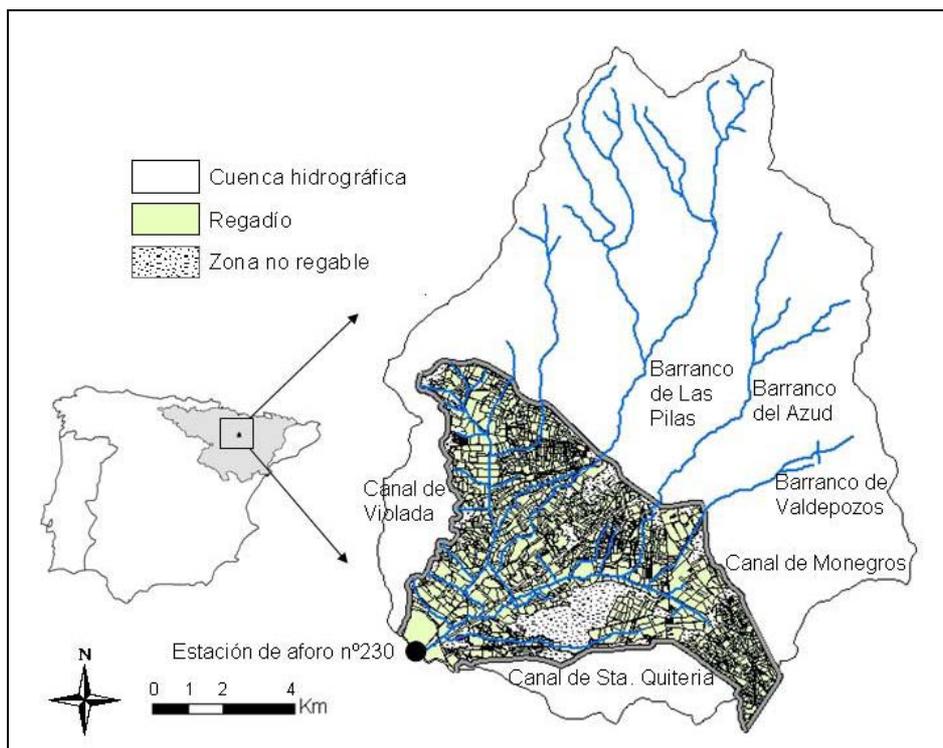


Figura 1. Zona regable de la Violada y cuenca hidrográfica del Barranco de la Violada en el contexto de la cuenca del Ebro.

La cuenca presenta una capa de arcillas impermeables en el subsuelo (Faci et al., 1985) por lo que las aguas de retorno de riego se recogen íntegramente por el barranco de la Violada.

El clima de la zona es de tipo Mediterráneo, con precipitaciones concentradas principalmente en primavera y otoño. Los valores medios anuales del periodo 1995-2008 son 446 mm de precipitación, 14 °C de temperatura y 1120 mm de evapotranspiración de referencia ( $ET_0$  – Penman-Monteith).

En los suelos del polígono domina la textura franco-arcillo-limosa, un contenido aceptable de materia orgánica (1-2%), pH entre 7.5 y 8.5 y contenidos altos de caliza (30%) y yeso (3%) (Torres, 1983). La capacidad de campo presenta un valor medio del 28%, y el punto de marchitez un valor medio del 19% (Playán et al., 2000). La conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada ( $CE_e$ ) es variable, pero frecuentemente está en torno a 2 dS/m, debido a la presencia de yeso. La CE de las ARR tiene un valor medio para los años hidrológicos 2006, 2007 y 2008 de 2.09 dS/m lo que refleja la presencia de yesos en La Violada (la CE de una solución saturada en yeso es de 2.21 dS/m).

### 3.- Material y métodos

El modelo original CIRF fue desarrollado por Tanji (1977) y calibrado y verificado en dos áreas de riego de la zona Oeste de Estados Unidos. El modelo CIRFLE es una modificación de CIRF que incluye la eficiencia del lavado de sales del suelo (Quílez, 1998). El modelo CIRFLE se basa en el principio de conservación de masa, tanto de agua como de sales y asume condiciones de estado estacionario por lo que solo puede usarse para predecir el comportamiento medio de un sistema de riego durante períodos largos de tiempo como un año hidrológico o una estación de riego.

El modelo está focalizado en la zona de raíces de los cultivos y considera los flujos más importantes de agua y sal dentro del sistema. CIRFLE se compone de un submodelo hidrológico acoplado a un submodelo salino y precisa de un total de 25 entradas para su resolución.

#### 3.1. Submodelo hidrológico

El submodelo hidrológico incluye los principales flujos de agua de un sistema de regadío (Figura 2). Las entradas principales son los volúmenes de agua de riego ( $Q_{diw}$ ), precipitación ( $Q_p$ ), aportes laterales superficiales ( $Q_{rim}$ ) y el agua inicial en el suelo ( $Q_{isw}$ ).

Una fracción del agua de riego se pierde por evaporación ( $Q_{evdiw}$ ) y se define en el modelo por el parámetro  $iwec$  (coeficiente de evaporación del riego). La fracción del agua de riego que infiltra el suelo ( $Q_{eaiw}$ ) se define a través del parámetro  $Eiae$  (eficiencia de aplicación del riego), que tiene en cuenta las pérdidas operacionales del sistema y las escorrentías en parcela. El resto de  $Q_{diw}$  (la fracción  $1 - iwec - Eiae$ ) se convierte en escorrentía ( $Q_{iwro}$ ) que se incorpora directamente a las aguas de retorno superficiales.

Respecto a la precipitación ( $Q_p$ ), una parte se evapora ( $Q_{evp}$ ), otra se pierde por escorrentía ( $Q_{pro}$ ) y el resto se infiltra en el suelo y constituye el agua efectiva de precipitación ( $Q_{ep}$ ).

El agua efectiva de riego y precipitación junto con el contenido inicial de agua en el suelo ( $Q_{isw}$ ) forman el contenido total de agua en el suelo ( $Q_{sw}$ ). Parte de este volumen de agua se pierde por evapotranspiración ( $Q_{et}$ ) y el resto supone el nuevo contenido de agua en el suelo ( $Q_{psw}$ ). Parte de esta agua queda almacenada en el suelo ( $Q_{fsw}$ ) y el resto se distribuye entre percolación profunda ( $Q_{dp}$ ) y agua de drenaje subsuperficial ( $Q_{sdw}$ ) mediante el coeficiente de percolación profunda ( $dpc$ ).

Las aguas superficiales de retorno de riego ( $Q_{sif}$ ) comprenden la escorrentía superficial de la precipitación ( $Q_{pro}$ ) y del riego ( $Q_{iwro}$ ), el drenaje subsuperficial ( $Q_{sdw}$ ) y los aportes laterales que vierten directamente a la red de drenaje ( $Q_{rim}$ ).

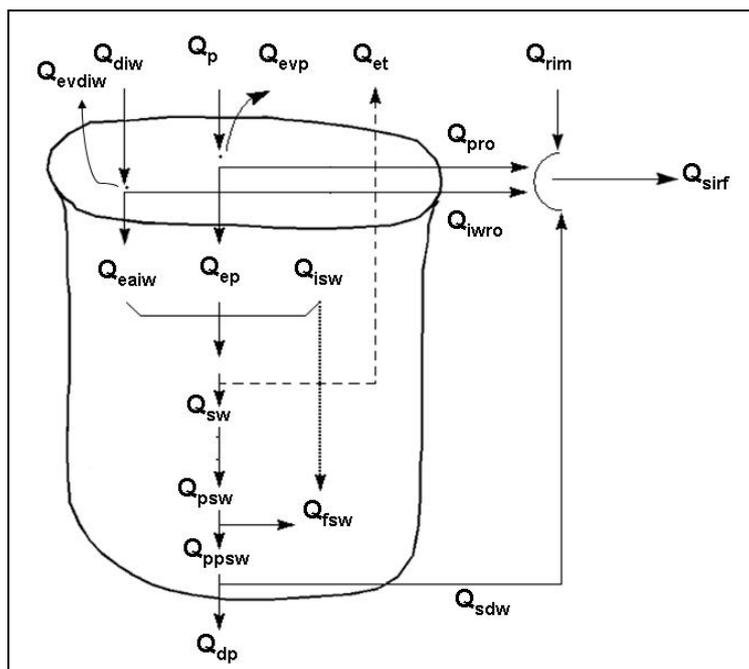


Figura 2. Esquema del submodelo hidrológico de CIRFLE. El símbolo  $Q$  es volumen de agua, expresado en mm,  $m^3/ha$ , ha-m o  $hm^3$ .

### 3.2. Submodelo salino

El submodelo salino (Figura 3) viene definido por la concentración de sales ( $C$ , sólidos disueltos totales en mg/l) y la masa de sales que cuando está asociada a un flujo de agua se obtiene como el producto del volumen y la concentración ( $M = Q \cdot C$ ).

Las entradas al sistema son la concentración y masa de sales del agua de riego ( $C_{diw}$ ,  $M_{diw}$ ), la precipitación ( $C_p$ ,  $M_p$ ), los aportes laterales ( $C_{rim}$ ,  $M_{rim}$ ) y la concentración y masa de sales inicial en el suelo ( $C_{isw}$ ,  $M_{isw}$ ) que depende de la salinidad del extracto saturado ( $EC_e$ ).

Parte de las sales aplicadas con el riego y la precipitación se pierden por escorrentía pudiendo disolver las sales que se encuentran sobre la superficie del terreno (entradas al modelo  $C_{iwrosp}$ ,  $C_{prosp}$ ), aumentando la concentración final de la escorrentía del riego y la precipitación ( $C_{iwro}$ ,  $C_{pro}$ ).

La concentración del agua efectiva de riego y precipitación ( $C_{eaiw}$ ,  $C_{ep}$ ) es mayor que  $C_{diw}$  y  $C_p$  debido a la evaporación del agua de riego y precipitación. Por el contrario las masas de sales que infiltran el suelo ( $M_{eaiw}$ ,  $M_{ep}$ ) son ligeramente menores y aumentan proporcionalmente con los coeficientes de eficiencia del riego ( $Eiae$ ) y la precipitación ( $1 - prc + pec$ ).

La concentración del agua en el suelo ( $C_{sw}$ ), calculada como la media ponderada por el volumen de las concentraciones de  $C_{eaiw}$ ,  $C_{ep}$  y  $C_{isw}$ , se incrementa por la reducción de su volumen debido a la evapotranspiración ( $C_{psw}$ ) mientras que la masa de sales no se ve afectada por este proceso ( $M_{sw} = M_{psw}$ ).

La precipitación – disolución del carbonato cálcico y precipitación de yeso ( $M_{sp} - M_{sd}$ ), se estiman a través de su relación con la fracción de lavado,  $FL$ , establecida por regresión:  $C_{sp} - C_{sd} = a + b \cdot FL$ ; donde los parámetros  $a$  y  $b$  (entradas del modelo) se obtuvieron de simulaciones realizadas con el programa Watsuit (Oster y Rhoades, 1990) para distintos tipos de agua.

La disolución de yeso se considera independientemente en CIRFLE. El porcentaje de yeso en el suelo es una entrada al modelo (*Gypsum*) y su disolución se produce hasta alcanzar saturación (2.63 g/l) o hasta su agotamiento en el suelo, incorporando una masa de sales  $M_{gsp}$  a la solución del suelo.

Una vez añadidas estas dos contribuciones  $M_{sp}-M_{sd}$  y  $M_{gsp}$  se obtiene una nueva concentración y masa de sales en el suelo ( $C'_{psw}$ ,  $M'_{psw}$ ). La salinidad del agua final en el suelo ( $C_{fsw}$ ), se obtiene a partir de la salinidad inicial y un coeficiente de eficiencia de lavado ( $k$ ), que depende principalmente de las características físicas del suelo. Así, suelos arenosos con una eficiencia de lavado alta tienen valores de  $k$  alrededor de 0,1 mientras que suelos arcillo-limosos con eficiencia de lavado más bajas tienen valores de  $k$  de 0,3 (Hoffman, 1986)

Una vez descontado el contenido final de sales en el suelo ( $C_{fsw}$ ,  $M_{fsw}$ ) la solución del suelo ( $C_{ppsw}$ ,  $M_{ppsw}$ ) se distribuye en dos componentes de igual concentración: percolación profunda ( $C_{dp}=C_{ppsw}$ ,  $M_{dp}$ ) y drenaje subsuperficial ( $C_{sdw}=C_{ppsw}$ ,  $M_{sdw}$ ).

La masa de sales en las ARR superficiales ( $M_{sif}$ ) es la suma de la masa de las componentes superficiales de la zona regable ( $M_{iwro}$ ,  $M_{pro}$ ) y del exterior del polígono ( $M_{rim}$ ) y de las aguas de drenaje subsuperficiales del regadío ( $M_{sdw}$ ). Su concentración ( $C_{sif}$ ) es la media ponderada por el volumen de las concentraciones de estas componentes.

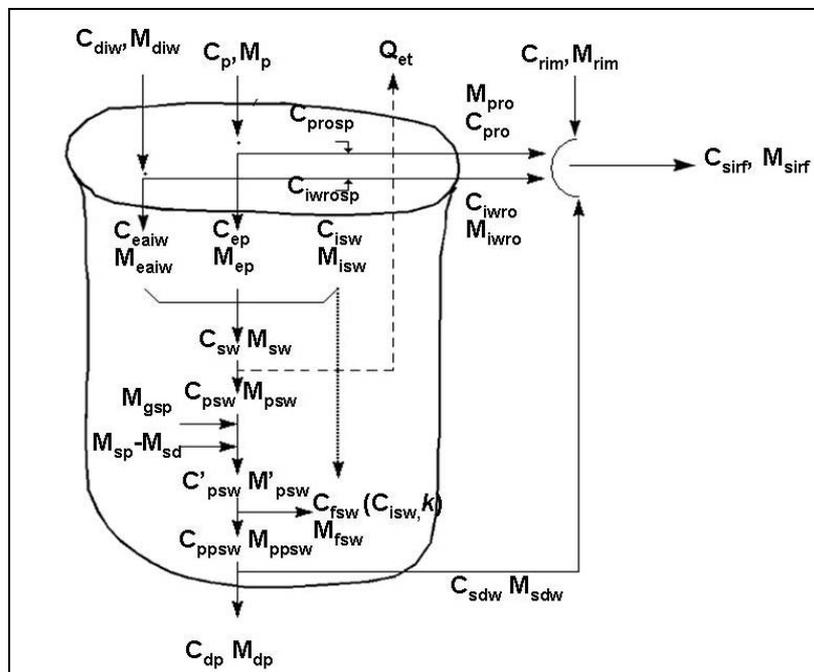


Figura 3. Esquema del submodelo salino de CIRFLE. El símbolo C se refiere a concentración de sales expresada en mg/l y el símbolo M a la masa de sales en Mg.

### 3.3 Entradas y salidas del modelo

El volumen de agua de riego ( $Q_{diw}$ ) y la superficie en regadío fueron facilitados por la Comunidad de Regantes de Almodévar (CRA) y por la oficina de la CHE en Huesca. La salinidad del agua de riego ( $C_{diw}$ ) se determinó a partir de 30 muestras tomadas en el canal de Monegros durante los años 2006, 2007 y 2008. La precipitación ( $Q_p$ ) se obtuvo de la estación meteorológica nº 9-491 del INM situada dentro de la zona regable y su salinidad se tomó del análisis de muestras de agua de lluvia para el año 2008. Las sales disueltas por la escorrentía del riego y la precipitación se tomaron de Quílez (1987) ( $C_{iwro} = 20$  mg/l,  $C_{prosp} = 40$  mg/l). Para el cálculo de la  $Q_{et}$ , se estimó en primer lugar la evapotranspiración máxima de cada uno de los cultivos (ETc) siguiendo la metodología de la FAO (Allen et al., 1998) y posteriormente se realizó un balance diario de agua en el suelo para cada cultivo con

la metodología desarrollada por Barros e Isidoro (2008). Este balance de agua en el suelo estimó en promedio valores anuales de  $Q_{et}$  inferiores en un 30% a la  $ET_c$ , debido al estrés hídrico producido por un manejo ineficiente del riego. Los contenidos de agua inicial y final en el suelo ( $Q_{isw}$  y  $Q_{fsw}$ ), distintos para cada año hidrológico, se obtuvieron también del balance de agua en el suelo (Barros e Isidoro, 2008).

Los coeficientes de escorrentía de la precipitación ( $prc = 0.013$ ), evaporación de la precipitación ( $pec = 0.038$ ) y percolación profunda ( $dpc = 0$ ) se tomaron de Quílez et al. (1987). Se utiliza un coeficiente de eficiencia de lavado  $k = 0$ , la condición más similar a la utilizada en los años 80. El coeficiente de evaporación del agua de riego ( $iwee$ ) se introduce por primera vez en este estudio con un valor de 0.001.

La profundidad media de la zona de raíces ( $D_r = 0.927$  m), se estimó a partir de los datos de Playán et al. (2000), mientras que los valores medios de densidad aparente ( $D_b = 1.5$  g/cm<sup>3</sup>), el porcentaje de saturación ( $SP = 49\%$ ), el contenido de yeso (Gypsum = 3.6%) y la conductividad eléctrica del extracto saturado ( $EC_e = 2.21$  dS/m) se tomaron de Torres (1983).

Los aportes laterales ( $Q_{rim}$ ) considerados inicialmente fueron la escorrentía superficial del exterior del polígono (ESC, estimada por separación del hidrograma), las aguas urbanas (URB, estimada como el 80% del agua detraída para usos urbanos e industriales) y los aportes directos de los canales (AC). La salinidad se estimó como la media ponderada por su volumen de la salinidad de las tres componentes.

Los aportes directos de los canales (AC) se deben a la apertura de tres compuertas situadas en el canal de Monegros cuyas aguas vierten directamente al Barranco de la Violada por tres barrancos naturales (Las Pilas, Azud y Valdepozos; Figura 1). Los AC se calcularon a partir de los registros diarios de altura de agua en el canal y de apertura de las compuertas facilitados por la CHE.

Tras las simulaciones realizadas con el modelo se constató la contribución a las ARR de una componente de agua de baja salinidad que no se había contabilizado hasta el momento. Dicha componente se atribuyó a filtraciones de los canales principales (Monegros, Violada y Santa Quiteria) que rodean la zona de estudio, cuyas estructuras de hormigón están muy deterioradas por la presencia de yesos.

Para estimar esas filtraciones (FC) se analizó la relación entre los valores mensuales de riego ( $R$ ) y el volumen de drenaje derivado directamente del riego ( $Q^* = Q - Q_{rim}$ ) para los seis meses de la estación de riego (abril a septiembre). Esta relación se analizó separadamente para los periodos 1995-2003 (canal antiguo de Violada con filtraciones presumiblemente elevadas) y 2004-2008 (nuevo canal elevado de Violada con entrada en funcionamiento en 2004 y sin filtraciones). Se observó una relación significativa entre ambas variables (Figura 4). Los valores de  $Q^*$  en ausencia de riego (u ordenada en el origen "a" de la relación  $Q^* = b \cdot R + a$ ) se tomaron como estimas mensuales de las FC. Estas estimas resultaron significativamente diferentes de cero y significativamente distintas ( $p < 0.001$ ) para los periodos 1995-2003 ( $a = 40$  mm/mes) y 2004-2008 ( $a = 8$  mm/mes) (Figura 4).

La regresión obtenida entre  $Q^*$  y  $R$  da estimas mensuales de FC, que es necesario multiplicar por el número de meses de servicio de los canales en cada año (número de meses con los canales llenos) para obtener estimas anuales de FC. Para ello se obtuvo el número medio de días al año con canales llenos en el periodo 1998-2008 (conocido a través de los registros de altura diaria de agua en los canales) ponderada por la longitud de cada canal en la zona de estudio (Monegros, 12.9 Km; Violada, 10 Km y la parte no elevada de Santa Quiteria, 3 Km, para los años 1995-2003, mientras que para el periodo 2004-2008 solo se tuvieron en cuenta el canal de Monegros y la parte elevada de Santa Quiteria, ya que el nuevo canal de La Violada estaba elevado en su totalidad).

Así, las filtraciones de los canales (FC) se estimaron en 347 mm/año hidrológico para el periodo 1995-2003 y en 67 mm/año hidrológico para el periodo 2004-2008.

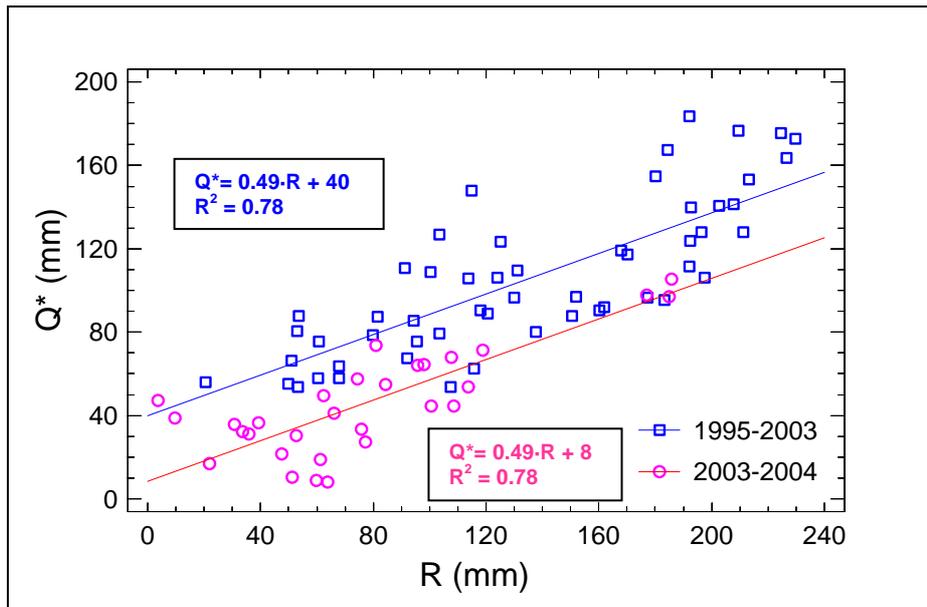


Figura 4. Relación entre el drenaje que deriva directamente del riego ( $Q^*$ ) y el riego ( $R$ ) aplicado en el polígono de la Violada para los periodos de 1995-2003 y 2004-2008. Los datos son valores mensuales de abril a septiembre.

El volumen de las aguas de retorno del riego de la zona regable de La Violada ( $Q_{sif}$ ) se midió de forma continua mediante un limnógrafo situado en la estación de aforos nº230 de la CHE en el barranco de La Violada (Figura 1). La salinidad ( $C_{sif}$ ) se determinó en las muestras diarias tomadas por un muestreador automático (ISCO 3700) instalado en dicha estación.

CIRFLE se aplicó en primer lugar con los parámetros de calibración de los años 80 con los datos de los años 1995-1998 y 2006-2008 utilizando los valores de  $Q_{et}$ ,  $AC$ ,  $Q_{isw}$  y  $Q_{fsw}$  estimados con las nuevas metodologías. Posteriormente se incluyó FC como entrada al modelo dentro de la variable  $Q_{rim}$ .

#### 4.- Resultados y Discusión

Para los años 80, la calibración de CIRF para el año 1982 produjo errores en la predicción de  $Q_{sif}$ ,  $C_{sif}$  y  $M_{sif}$  inferiores al -2%. El modelo calibrado se validó con datos medidos en los años hidrológicos 1983 y 1984, con errores máximos de estimación del -2% para  $Q_{sif}$ , 13% para  $C_{sif}$  y 12% para  $M_{sif}$  (Quílez et al., 1987).

Las estimas de CIRFLE con datos del polígono de La Violada para los años 90 (1995-1998) y 00 (2006-2008) produjeron diferencias medias con los valores medidos del -28% ( $Q_{sif}$ ), 46% ( $C_{sif}$ ) y 6% ( $M_{sif}$ ) (años 90) y -10% ( $Q_{sif}$ ), 16% ( $C_{sif}$ ) y 4% ( $M_{sif}$ ) (años 00) (Tabla 1) utilizando el valor de  $E_{iae} = 0.916$  obtenido en la calibración de los años 80 y los valores de  $Q_{et}$ ,  $Q_{isw}$ ,  $Q_{fsw}$  y  $AC$  estimados con las nuevas metodologías (Barros e Isidoro, 2008). En ambos periodos las estimas de  $Q_{sif}$  fueron sensiblemente menores y las de  $C_{sif}$  sensiblemente mayores a los valores medidos. Estas diferencias sugieren que el barranco de La Violada recoge aportes de agua no controlados de baja salinidad. Las filtraciones de canales (FC) (en particular, del canal de Violada antes de 2004) podrían explicar estas diferencias, razón por la cual se efectuaron sus estimas tal como se ha detallado en el apartado de material y métodos.

La introducción en CIRFLE de las estimas de FC para los 90 (347 mm) y los 00 (67 mm) se efectuó como parte integrante de las entradas laterales superficiales ( $Q_{rim}$ ) considerando en primera aproximación que su salinidad era similar a la del agua de riego. Con la inclusión de FC y el resto de variables y parámetros similares a los

utilizados en la Tabla 1, el error medio de estimación de CIRFLE disminuyó sensiblemente: 4% ( $Q_{sif}$ ), 6% ( $C_{sif}$ ) y 11% ( $M_{sif}$ ) (años 90), y 7% ( $Q_{sif}$ ), 0% ( $C_{sif}$ ) y 7% ( $M_{sif}$ ) (años 00) (Tabla 2).

Tabla 1. Volumen ( $Q_{sif}$ , mm), salinidad ( $C_{sif}$ , mg/l) y masa de sales ( $M_{sif}$ , Mg) de las ARR medidos y estimados por CIRFLE y error de las estimaciones del modelo para los periodos 1995-1998 y 2006-2008 utilizando la calibración de los años 80 y una mejor estimación de los valores de entrada de  $Q_{et}$ ,  $Q_{isw}$ ,  $Q_{fsw}$  y AC.

	MEDIDO			CIRFLE			%ERROR		
	$Q_{sif}$	$C_{sif}$	$M_{sif}$	$Q_{sif}$	$C_{sif}$	$M_{sif}$	$Q_{sif}$	$C_{sif}$	$M_{sif}$
1995	1038	1610	66010	749	2414	71400	-28%	50%	8%
1996	1125	1750	77757	840	2546	84465	-25%	45%	9%
1997	1165	1800	82435	846	2544	84651	-27%	41%	3%
1998	1059	1700	71157	726	2534	75365	-31%	49%	6%
<b>Media (1995-1998)</b>							<b>-28%</b>	<b>46%</b>	<b>6%</b>
2006	427	1982	33994	424	2299	39093	-1%	16%	15%
2007	527	1922	40676	430	2363	40765	-18%	23%	0%
2008	300	1997	24052	269	2177	23465	-11%	9%	-2%
<b>Media (2006-2008)</b>							<b>-10%</b>	<b>16%</b>	<b>4%</b>

Tabla 2. Volumen ( $Q_{sif}$ , mm), salinidad ( $C_{sif}$ , mg/l) y masa de sales ( $M_{sif}$ , Mg) de las ARR medidos y estimados por CIRFLE y error de las estimaciones del modelo para los periodos 1995-1998 y 2006-2008 utilizando la calibración de los años 80, una mejor estimación de los valores de entrada de  $Q_{et}$ ,  $Q_{isw}$ ,  $Q_{fsw}$  y AC y considerando las filtraciones de los canales (FC) como nueva entrada al modelo.

	MEDIDO			CIRFLE			%ERROR		
	$Q_{sif}$	$C_{sif}$	$M_{sif}$	$Q_{sif}$	$C_{sif}$	$M_{sif}$	$Q_{sif}$	$C_{sif}$	$M_{sif}$
<i>FC=347mm</i>									
1995	1038	1610	66010	1096	1727	74881	6%	7%	13%
1996	1125	1750	77757	1187	1876	87954	6%	7%	13%
1997	1165	1800	82435	1193	1878	88120	2%	4%	7%
1998	1059	1700	71157	1100	1815	78855	4%	7%	11%
<b>Media 1995-1998</b>							<b>4%</b>	<b>6%</b>	<b>11%</b>
<i>FC=67 mm</i>									
2006	427	1982	33994	491	2020	39778	15%	2%	17%
2007	527	1922	40676	498	2081	41611	-6%	8%	2%
2008	300	1997	24052	336	1793	24148	12%	-10%	0%
<b>Media 2006-2008</b>							<b>7%</b>	<b>0%</b>	<b>7%</b>

Las estimaciones realizadas con CIRFLE mejoraron sensiblemente con la inclusión de FC, tanto para el volumen de agua ( $Q_{sif}$ ) donde los errores de estimación fueron inferiores al 6% en los años 90 y de  $\pm 15\%$  en los años 00, como para la concentración de sales ( $C_{sif}$ ), con errores menores al 7% y  $\pm 10\%$  respectivamente para cada periodo (Tabla 2).

El volumen de las aguas de retorno ( $Q_{sif}$ ) en los años 90 fue sistemáticamente mayor al valor medido (error medio de 4%) al igual que para los años 2006 y 2008. Este error de estimación puede deberse a una sobreestimación de las filtraciones de los canales para estos años, ya que no se han tenido en cuenta las diferencias entre canales (se asume que todos los canales filtran por igual) ni las diferencias entre años, tomándose un valor medio de filtraciones para cada periodo. En el año 2006, debido a

las restricciones de agua para riego, la altura de agua en el canal de Monegros fue inferior que en el resto de los años lo que sugiere que las filtraciones puedan ser menores para ese año que para el resto de años del periodo. A esto se le une que debido a la poca disponibilidad de agua, la reutilización de las aguas de drenaje para riego en 2006 fue superior al resto de los años. El error de estimación de CIRFLE para el año 2006 puede achacarse a estas diferencias, que no se han tenido en cuenta en el modelo.

En el año 2008 tanto el canal de Monegros como el de Santa Quiteria llevaron menos agua, por lo que las FC pueden estar también sobreestimadas. Además, este último año tuvo una superficie regada de tan solo 2198 ha (debido al proceso de transformación a riego por aspersión que se está realizando en la zona) por lo que las características no son similares al resto de los años lo que hace posible que no se hayan estimado correctamente algunos términos de entrada al modelo.

## **5.- Conclusiones y recomendaciones**

El modelo CIRFLE estima el volumen y salinidad (concentración y masa) de las ARR superficiales con una precisión aceptable si se emplean metodologías adecuadas de estimación de los parámetros y variables de entrada al modelo. La información recopilada en los 90 y 00 en el polígono de riego de La Violada ha permitido estimar las filtraciones de los canales como entrada importante de agua en el sistema. La inclusión en CIRFLE de estas filtraciones, junto con unos valores de evapotranspiración que contemplan posibles estreses hídricos derivados del manejo inadecuado del riego, el contenido de agua inicial y final en el suelo y los aportes directos, mejora sensiblemente sus predicciones, con errores medios de las estimas en los años 90 y 00 inferiores al  $\pm 7\%$ .

Teniendo en cuenta las simplificaciones del modelo, los errores de predicción obtenidos han sido bajos, lo que permite concluir que CIRFLE es una herramienta eficaz para el análisis de la contaminación salina en zonas con características similares a La Violada.

## **6.- Agradecimientos**

La Comunidad de Regantes de Almodévar ha facilitado la información necesaria sobre prácticas de riego y superficies de cultivo y la Confederación Hidrográfica del Ebro los datos de riego, aforo y manejo de canales necesarios. Este estudio está financiado por el proyecto AGL 2006-11860/AGR del Plan Nacional de I+D+i, y el doctorado de Rocío Barros con una beca del proyecto INCO-CT-2005-015031 (Qualiwater).

## **7.- Referencias**

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M., 1998. Crop evapotranspiration- Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage paper 56. FAO, Roma, 300 p.
- Aragüés, R, Tanji, K.K., Quílez, D., Alberto, F., Faci, J., Machín, J. y Arrúe, J.L., 1985. Calibration and Verification of an Irrigation Return Flow Hydrosalinity Model, *Irrigation Science* 6:85-94.
- Barros R., Isidoro, D., 2008. Balance de agua a largo plazo en la zona regable de La Violada (Huesca), *XXVI Congreso Nacional de Riegos*; Huesca, 24-26 de junio de 2008.

- Confederación Hidrográfica del Ebro, CHE, 1996. Plan hidrológico de la cuenca del Ebro. Disponible en <http://oph.chebro.es/PlanHidrologico/inicio.htm>.
- Confederación Hidrográfica del Ebro, CHE, 2007. 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. Convenio de colaboración CITA-CHE, p. 284.
- Faci, J., Aragüés, R., Alberto, F., Quílez, D., Machin, J., Arrue, J.L., 1985. Water and salt balance in an irrigated area of the Ebro River Basin (Spain). *Irrigation Science* 6, 29-37.
- Hoffman, G., 1986. Guidelines for reclamation of salt-affected soils. *Applied Agric. Res.*, 1(2), 65-72.
- Isidoro, D., Aragüés R., 2006. A twenty-year analysis of salt and nitrogen export loads in La Violada irrigation district (Spain). *International Symposium on Water and Land Management for Sustainable Irrigated Agriculture*. Cukurova University. Adana (Turkey), 4-8 April 2006. CD Proceedings. 18 pp.
- Isidoro D., Barros R., Quílez D., Aragüés R., 2008. Twenty-five years of salt export loads in the irrigation return flows of La Violada irrigation district (Spain). *2<sup>nd</sup> International Salinity Forum*, Adelaide (Australia), 31 marzo - 3 abril de 2008.
- Oster J.D., Rhoades J.D., 1990. Steady-state root zone salt balance. En: Tanji K.K. (ed.) *Agricultural Salinity Assessment and Management*, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice 71, ASCE. Cap. 22:469-481.
- Playán E., Slatni A., Castillo R., Faci J.M., 2000. A case study for irrigation modernization II. Scenario analysis. *Agric. Water Manage.* 42: 335-354.
- Quílez, D., 1998. La salinidad en las aguas superficiales de la Cuenca del Ebro: Análisis del impacto Potencial del Regadío de Monegros II. Tesis doctoral. Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria, Universitat de Lleida, Lleida, España, p. 352.
- Quílez, D., Aragüés, R., Faci, J.M., 1987. Calibración, verificación y aplicación de un modelo conceptual hidrosalino del sistema «flujos de retorno de riego». *Inv. Agr.: Prod. Prot. Veg.* 2(2):165-182.
- Tanji, K.K., 1977. A conceptual hydrosalinity model for predicting salt load in irrigation return flow. *Managing saline water for irrigation*. Texas Tech. Univ. pp.49-70.
- Thayalakumar, T., Bethune, M.G., McMahon, T.A., 2007. Achieving a salt balance—should it be a management objective?. *Agric. Water Manage.* 92, 1-12.
- Torres, M., 1983. Balance hidrosalino de un polígono de riego en los Llanos de La Violada (Huesca). Tesis de Master, Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza (CIHEAM-IAMZ), Zaragoza, España, p. 273.
- UE —Unión Europea, 2000. Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2000 por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas, Diario Oficial de las Comunidades Europeas L32.7, 22/12/2000, p.1-72.