

## DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN EL SUELO EN RIEGO POR SURCOS ALTERNOS Y NO ALTERNOS EN EL CULTIVO DE MAÍZ

Gerard Arbat<sup>1\*</sup>, Francesc Domingo Olivé<sup>2</sup>, Albert Roselló<sup>2</sup>, Jaume Puig-Bargués<sup>1</sup> y Francesc Ramírez de Cartagena<sup>1</sup>

1: Departament d'Enginyeria Química, Agrària i Tecnologia Agroalimentària, Universitat de Girona, Campus Montilivi 17071 Girona, gerard.arbat@udg.edu

2: IRTA-Estació Experimental Fundació Mas Badia, Ctra. De la Tallada, s/n, 17134 La Tallada (Girona).

**Palabras clave:** Surcos alternos, Distribución de agua en el suelo, HYDRUS, WinSRFR, Maíz (*Zea mays*), Eficiencia en el uso del agua

**RESUMEN.** *Se realizó un ensayo para estudiar la distribución de agua en el suelo y la respuesta del cultivo del maíz en riego con surcos alternos (RSA) y no alternos (RSNA) en un suelo de textura franco-arenosa. Los perfiles de infiltración determinados a partir de las medidas experimentales durante los riegos y la aplicación del código WinSRFR mostraron que la uniformidad de distribución (DU) fue del 76.9% en RSNA y del 84.5% en RSA. Durante los riegos el agua alcanzó rápidamente el final de los surcos debido al sellado superficial, limitando la dosis de agua que se pudo aplicar en cada riego. Los resultados de la modelación con el código HYDRUS y las medidas de campo después de los riegos mostraron que raramente se producían incrementos del contenido de agua por debajo de los 20 cm de profundidad. La eficiencia en el uso del agua (WUE) fue de 2.33 kg m<sup>-3</sup> en RSA y de 2.62 kg m<sup>-3</sup> en RSNA.*

**ABSTRACT.** *A field study to examine soil water distribution and corn crop response under alternate furrow irrigation (AFI) and non alternate furrow irrigation (NAFI) on a sandy-loam soil was carried out. Infiltration profiles obtained from experimental measurements and the application of WinSRFR code shown that distribution uniformity (DU) was 76.9% for NAFI and 84.5% for AFI. During the irrigation events the water quickly reached the end of the furrows due to soil surface sealing, which reduced the water dose that could be applied during each irrigation event. Modeling results with HYDRUS code and soil water measurements after the irrigation events shown that soil water increments were rarely observed below 20 cm of depth. The water use efficiency (WUE) was 2.33 kg m<sup>-3</sup> with AFI and 2.62 kg m<sup>-3</sup> with NAFI.*

### 1. INTRODUCCIÓN

En España y en general en los países desarrollados el riego por superficie se ha reducido frente a otros sistemas de riego como el riego por aspersión o por goteo. Sin embargo, el riego por superficie sigue siendo ampliamente utilizado, puesto que en el año 2007 en España el 37% de la superficie se regaba por gravedad (Playán, 2008). Las perspectivas indican que este sistema va a continuar siendo utilizado debido a las importantes ventajas que presenta: bajos costes de instalación, mínimo consumo de energía, así como los pocos residuos plásticos que genera.

El riego simultáneo de todos los surcos (RSNA), variante del riego por superficie, es el sistema más utilizado en el cultivo del maíz y permite obtener elevadas eficiencias de aplicación (Clemmens y Dedrick, 1994). La técnica consistente en bloquear la parte final del surco para impedir las pérdidas de agua por escorrentía se ha mostrado eficaz para mejorar la eficiencia de aplicación (Cahoon et al. 1995; Arbat 2008). Existen trabajos que muestran que el riego por surcos alternos (RSA), consistente en regar un surco dejando el surco adyacente sin regar, reduce el consumo de agua manteniendo la producción del cultivo (Graterol et al., 1993; Kang et al., 2000; Webber et al., 2006; Horst et al., 2005, 2007).

Una hipótesis que podría explicar la mejora en la eficiencia del uso del agua, *WUE* (kg m<sup>-3</sup>) en el RSA es el incremento del movimiento lateral del agua en el suelo, que reduce las pérdidas por percolación profunda. Otra

hipótesis es que en el RSA parte del sistema radicular del cultivo se encuentra en condiciones de riego deficitario, lo que induciría a reducir la transpiración del cultivo y de esta forma la  $WUE$  podría verse incrementada (Webber et al., 2006).

La aplicación de modelos resulta muy útil para poder interpretar y extender las mediciones de campo. En este sentido el código WinSRFR 2.1 (USDA, 2006) permite determinar la lámina de agua infiltrada a lo largo del surco basándose en las ecuaciones de Saint Venant y la función de infiltración de Kostiakov. Por otra parte, el código HYDRUS (Simunek et al., 2006) permite simular la distribución de agua en el suelo en riego por surcos mediante la ecuación de Richards (Abbasi et al., 2004; Arbat et al., 2007; Mailhol et al., 2007; Crevoisier et al., 2008)

Los objetivos del presente estudio son: (i) analizar la dinámica de agua en el suelo en RSA y RSNA y (ii) evaluar la eficiencia en el uso del agua,  $WUE$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) en cada uno de los sistemas.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1. Descripción del ensayo

Las pruebas se realizaron en la Estación Experimental Agrícola Mas Badia (La Tallada d'Empordà, Girona) durante el año 2008. Se aplicaron 2 tratamientos (el riego por surcos alternos - RSA el riego por surcos no alternos - RSNA) con 3 repeticiones de cada uno de ellos repartidos en bloques al azar. Cada repetición del tratamiento RSA estaba formada por 8 surcos de 0.75 m de ancho y 130 m de largo, mientras que cada repetición del tratamiento RSNA estaba formada por 6 surcos de las mismas dimensiones.

El 7 de abril de 2008 se sembró maíz (*Zea mays L.*) en una parcela nivelada con una pendiente de  $0.0015 \text{ mm}^{-1}$ . La separación entre hileras fue de 0.75 m y entre plantas de 0.17 m. Cuando el maíz alcanzó aproximadamente 0.4 m de altura se procedió al asurcado, quedando la planta en la zona superior del caballón formado. El riego se realizó con una manga de polietileno flexible con un agujero dispuesto al inicio de cada surco. Durante el riego el regante podía variar el caudal entrante en cada surco variando el número de surcos que se regaban simultáneamente. El criterio utilizado para cortar el riego en una repetición determinada fue que cuando en la mitad de los surcos el agua alcanzaba el final se cerraban todos los surcos de dicha repetición. El final de los surcos se bloqueó con una mota de tierra para evitar pérdidas de agua por escorrentía.

Antes y después de cada riego, en una de las repeticiones, se realizaron medidas del contenido de agua en el suelo con una sonda basada en la reflectometría en el dominio del tiempo (TDR-IMKO Trime T-FM), calibrada en condiciones de suelo similares. Los contenidos de agua se midieron a 20, 70 y 120 cm del inicio del surco y en distintas posiciones respecto de la sección transversal del surco: caballón y fondo del surco en el tratamiento RSNA y caballón, fondo del surco regado y fondo del surco no regado en el tratamiento RSA. En cada una de las posiciones se tomaron medidas de contenido de agua de 0 a 80 cm de profundidad en el caballón y de 0 a 180 cm en el fondo del surco con intervalos de 20 cm.

El suelo (*Oxyaquic Xerofluvents*), presentaba una textura franco-arenosa con un aumento del contenido de arena con la profundidad.

Se determinó la granulometría, la densidad aparente, el contenido de agua del suelo ( $\theta$ ) a 33 y 1500 kPa y el contenido de materia orgánica en una muestra homogeneizada de 0 a 60 cm de profundidad (Tabla 1).

**Tabla 1.** Porcentaje de arena, limo, arcilla y materia orgánica del suelo

Profundidad (cm)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Densidad aparente ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\theta_{33 \text{ kPa}}$ ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )	$\theta_{1500 \text{ kPa}}$ ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )	Materia orgánica (%)
0-60	69.3	23.3	7.4	1.74	0.174	0.073	1.0

La pauta de riego pretendió aplicar una dosis de riego inferior a las necesidades de agua del cultivo para conocer el efecto que tendría una restricción de agua para el uso agrícola, puesto que el RSA puede representar una alternativa interesante para el ahorro de agua.

## 2.2. Determinación del término de extracción de agua por el cultivo

A efecto de contemplar el término sumidero se calcularon las necesidades de agua del cultivo a partir de la evapotranspiración del cultivo,  $ET_c$  (Allen et al., 1998). La evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ) se calculó a partir del método de Penman-Monteith con medidas de la Estación Agrometeorológica de Mas Badia, perteneciente a la XAC (Red de Estaciones Agrometeorológicas de Cataluña), situada a unos 150 m del campo de ensayo. La lluvia efectiva se consideró como el 80% de la lluvia registrada en la misma estación y el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) se determinó a partir de los valores propuestos por Allen et al. (1998) correspondientes a España.

## 2.3. Análisis de los eventos de riego

La campaña de riego se inició el 26 de junio de 2006 y finalizó el 28 de agosto, realizándose 13 riegos en el tratamiento RSA y 9 riegos en el RSNA. El periodo medio entre riegos fue de  $5.3 \pm 2.3$  días para el RSA y de  $7.9 \pm 3.2$  días para el RSNA. Se realizó una evaluación completa de los eventos de riego efectuados los días 28 de julio y 9 de agosto de 2006, en los que se midieron los caudales de entrada, el tiempo de inicio y final del riego, los tiempos de avance y receso y la lámina de agua en distintas posiciones. En todos los riegos se midió el tiempo de riego y el contenido de agua en el suelo antes y después de 48 a 72 h de cada riego. El agua aplicada en los demás riegos se calculó a partir del tiempo de riego y del caudal medio. La dosis aplicada,  $D_{app}$  ( $m^3 ha^{-1}$ ) se calculó como:

$$D_{app} = \frac{Q t_{co} 60}{L W} \quad (1)$$

en la que  $Q$  es caudal medio ( $Ls^{-1}$ ),  $t_{co}$  el tiempo de corte (min),  $L$  la longitud del surco (133 m) y  $W$  la separación entre surcos regados (1.5 en el RSA y 0.75 m en el caso de RSNA). Se utilizó el código WinSRFR 2.1 (USDA, 2006) para determinar la lámina de agua infiltrada a lo largo del surco y la uniformidad de distribución del riego ( $DU$ ), definida como:

$$DU = \frac{\text{Promedio de la lámina infiltrada en el 25\% del campo que menos agua recibe}}{\text{lámina de agua media infiltrada}} 100 \quad (2)$$

La función de infiltración de Kostiakov, necesaria para las simulaciones realizadas con el código WinSRFR, fue calibrada a partir de las medidas de avance utilizando el método de los 2 puntos (Elliot y Walker 1983).

## 2.4. Producción de maíz, uso de agua ( $WU$ ), eficiencia en el uso del agua ( $WUE$ ) y déficit de agua ( $Def$ )

Con una mini cosechadora (Nursery Master Elite- Wintersteiger) se recogió el grano correspondiente a cada tratamiento y posición dentro de la hilera. En cada repetición se recolectaron 2 hileras en las posiciones situadas a 15, 40, 65, 90 y 115 m desde el inicio del surco, recogiendo 10 m consecutivos desde cada una de las posiciones. Se midió la humedad del grano y se estandarizó su producción a un 14% de humedad.

El uso de agua ( $WU$ ) se determinó como:

$$WU = \text{Riego} + \text{Precipitación efectiva} \quad (3)$$

La eficiencia en el uso del agua ( $WUE$ ) se calculó como:

$$WUE = \frac{\text{Producción media}}{WU} \quad (4)$$

El déficit de agua ( $Def$ ) se definió como:

$$Def = ETc - WU \quad (5)$$

## 2.5. Modelado de la distribución de agua en el suelo

La distribución de agua en el suelo se modeló con la ecuación de Richards considerando un término sumidero para incorporar la evapotranspiración. Se utilizó el código HYDRUS (Simunek et al., 2006) para resolver numéricamente la ecuación.

La separación de los términos evaporativo y transpirativo se realizó restando a la evapotranspiración del cultivo la evaporación potencial determinada con el modelo de Ritchie (1972)

Las propiedades hidráulicas del suelo se consideraron según la ecuación de van Genuchten-Mualem. Los parámetros de la ecuación se estimaron utilizando los contenidos de arena, limo, arcilla, densidad aparente y contenido de agua a 33 y 1500 kPa mediante el código Rosetta Lite integrado en el código HYDRUS.

En la zona del surco correspondiente a los nodos situados en contacto con la superficie del suelo se consideraron unas características hidráulicas diferenciadas, ya que a causa del paso del agua se formó un sello que se caracteriza por disminuir significativamente la velocidad de infiltración (Valentin y Bresson, 1992). Para tener en cuenta este efecto se calibró por modelación inversa la conductividad hidráulica del suelo a partir de los datos de la función de infiltración de Kostiakov obtenida experimentalmente. Después de la calibración la conductividad hidráulica del sello se redujo un orden de magnitud pasando de  $0.6721 \text{ cm h}^{-1}$  a  $0.0626 \text{ cm h}^{-1}$ .

La dimensión de los elementos finitos triangulares situados en superficie fue de unos 2 cm de lado, creciendo con la profundidad hasta alcanzar una dimensión aproximada de 5 cm a 2 m de profundidad. El menor tamaño de los elementos situados en superficie se justifica porque en esta zona los flujos de agua fueron más activos y la geometría más compleja.

La extracción de agua en el suelo por parte de la planta se consideró hasta 1.10 m, con una reducción a medida que aumentaba la profundidad, siguiendo el patrón de reducción de la densidad de longitud radicular (cm de raíz  $\text{cm}^{-3}$  de suelo) observada en campos experimentales de maíz en parcelas próximas (Ramos, 2005).

## 2.6. Tratamiento estadístico de los datos

Para el análisis estadístico se aplicó el procedimiento GLM del paquete estadístico SAS (SAS Institute, Cary, NC, USA). Se realizaron el tests de separación de medias LSD con un nivel de significación en el análisis de probabilidades de 0.05.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Características de los riegos

Los valores medios del caudal, tiempo de riego, dosis y  $DU$  (26 de junio de 2006 y 28 de agosto 2008) se indican en la Tabla 2. Se destaca que la dosis de riego aplicada fue significativamente mayor en el RSA.

**Tabla 2.** Caudal, dosis y tiempo de riego en el RSA y RSNA (26 de junio de 2006 y 28 de agosto 2008).

Tipo de riego	Caudal ( $\text{l s}^{-1}$ )	Tiempo de riego (min)	Dosis ( $\text{m}^3\text{ha}^{-1}$ )	$DU$ (%)
RSA	$0.429 \pm 0.091$	$108.3 \pm 5.3$	$139.4 \pm 29.4^A$	$84.5 \pm 4.2^a$
RSNA	$0.432 \pm 0.116$	$85.0 \pm 30.7$	$216.3 \pm 79.6^B$	$76.9 \pm 7.7^b$

Nota: Los valores medios con distinta letra mayúscula son significativamente distintos a un nivel de significación  $p < 0.05$ . Los valores medios con distinta letra minúscula son significativamente distintos a un nivel de significación  $p < 0.10$ .

La dosis media de riego considerando toda la campaña, calculada a partir del tiempo de riego medido en cada uno de los riegos y del caudal medio para cada sistema, resultó ser de  $107.5 \pm 21.8 \text{ (m}^3\text{ha}^{-1}\text{)}$  en RSA y  $206.5 \pm 35.0 \text{ (m}^3\text{ha}^{-1}\text{)}$  en RSNA. Las dosis aplicadas resultan muy bajas para un riego por surcos, lo que obligaría a aplicar una gran cantidad de riegos, representando un inconveniente para el agricultor. La baja velocidad de infiltración a causa del sellado hizo que el agua rápidamente alcanzase el final del surco y

obligara a cortar el riego para evitar que desbordase en la parte final de los surcos, dando como resultado una baja dosis de riego. Según los resultados obtenidos con el código WinSRFR (no mostrados en la comunicación) una reducción del caudal de entrada hubiera permitido aplicar una dosis de riego mayor aunque a costa de reducir la  $DU$ .

Durante los riegos se observó que el avance de agua fue más rápido en el RSNA que en el RSA. En este sentido Graterol et al. (1993) indicaron que el mayor gradiente lateral de potencial matricial en el RSA reduce la velocidad de avance del agua en el surco. La función de infiltración de Kostiakov obtenida a partir de los valores medios en cada tipo de riego (Figura 1) muestra que la lámina de agua infiltrada para un determinado tiempo fue superior en el RSA que en el RSNA, lo que puede ser explicado por la menor velocidad de avance del agua en el RSA. La uniformidad de distribución ( $DU$ ) fue ligeramente superior en el RSA que en el RSNA (Tabla 2). En el caso del RSNA el valor de la  $DU$  fue similar a la observada en campos de productores de maíz de la zona, en los que  $DU$  fue de  $68.0\% \pm 13.1\%$  (Rovira, 2005).

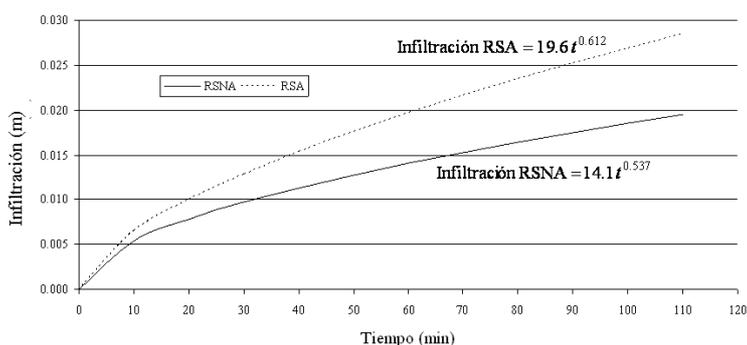


Figura 1. Funciones de infiltración medias en el RSA y RSNA

En la mayoría de los surcos observados, tanto en RSA como en RSNA, el perfil de infiltración característico obtenido a partir del código WinSRFR fue como el que se muestra en la Figura 2, con mayor cantidad de agua infiltrada al final del surco que en su inicio, aunque en alguno de los riegos también hubo surcos en que la lámina de agua infiltrada fue menor al final que al inicio del surco, debido a que en cada repetición el riego se cortó cuando en la mitad de los surcos el agua alcanzó su final.

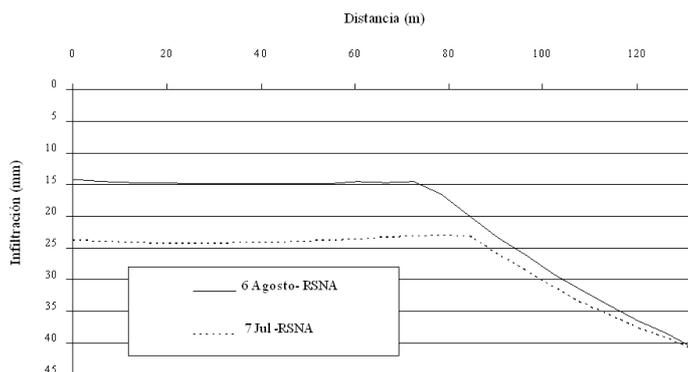


Figura 2. Lámina de agua infiltrada a lo largo de un surco durante los eventos de riegos de 7/7/2008 y 6/8/2008 en el RSNA

### 3.2. Medidas del contenido de agua en el suelo y lámina de agua en los primeros 80 cm

El valor medio de la lámina de agua hasta 80 cm de profundidad a lo largo de la campaña de riego indica que cuando se comparan los dos tipos de riego hay diferencias significativas tanto en su conjunto como en cada una de las posiciones (Tabla 3). La lámina de agua se calculó a partir de las medidas de contenido de agua en cada posición, la localización de las distintas posiciones se indica en la Figura 3.

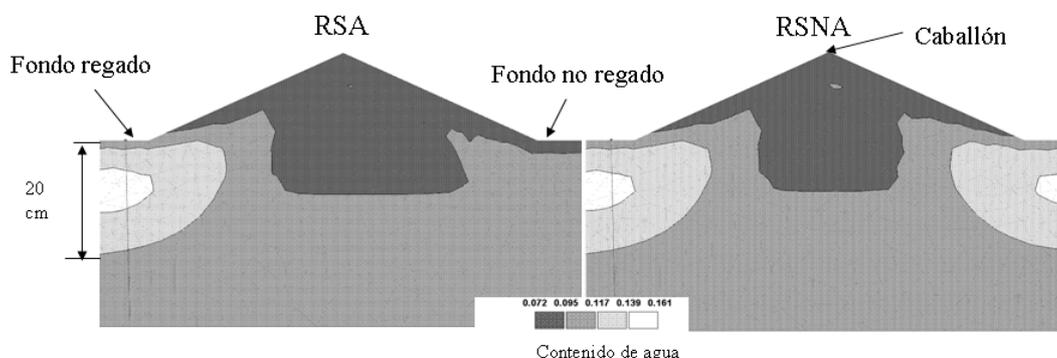


Figura 3. Distribución de agua en el suelo en RSA y RSNA cuatro días después del riego (14/08/2008) obtenida con HYDRUS

Tabla 3. Valor medio de la lámina de agua hasta 80 cm de profundidad durante la campaña de riego (7/7/2008 – 21/8/2008) y diferencia entre las láminas de riego en distintas posiciones.

Tipo de riego	Lámina de agua (mm)		
RSA	96.2±7.6 <sup>A</sup>		
RSNA	103.7±7.3 <sup>B</sup>		
Diferencias entre posiciones y tipo de riego	Diferencia entre medias (mm)	95 % Límites de confianza	
Fondo RSNA – Caballón RSNA	0.376	-2.549	3.300
Fondo RSNA – Fondo regado RSA	6.377 *	3.494	9.261
Fondo RSNA – Fondo no regado RSA	7.240 *	4.356	10.123
Fondo RSNA – Caballón RSNA	9.386 *	6.502	12.270
Caballón RSNA – Fondo regado RSA	6.002 *	3.118	8.885
Caballón RSNA – Fondo no regado RSA	6.864 *	3.980	9.747
Caballón RSNA – Caballón RSA	9.010 *	6.126	11.894
Fondo regado RSA – Fondo no regado RSA	0.862	-1.980	3.704
Fondo regado RSA – Caballón RSA	3.008 *	0.166	5.851
Fondo no regado RSA – Caballón RSA	2.146	-0.696	4.988

Nota: Los valores medios con distinta letra mayúscula son significativamente distintos a un nivel de significación  $p < 0.05$ . Las diferencias de lámina de agua media que presentan diferencias a un nivel de significación  $p < 0.05$  se indican con \*.

La mayor lámina de agua en el RSNA responde a que el volumen de agua aplicado fue superior en este tipo de riego con 139.7 mm frente a los 185.8 mm aplicado en el RSA (Tabla 4). En el RSNA la lámina de agua es superior en el fondo del surco que en el caballón, como cabría esperar y en el RSA la lámina de agua es superior en el fondo del surco regado que en el caballón y no existe diferencias significativas entre el fondo del surco no regado y el caballón. En los dos sistemas la evolución de la lámina de agua a lo largo de la campaña de riego mostró una reducción progresiva de la reserva a medida que transcurre la temporada de riego, lo que responde a una reducción de la reserva de agua en el suelo ante una estrategia de riego deficitaria.

### 3.4. Agua aplicada, producción y eficiencia en el uso del agua

Aunque en el RSNA se realizaron 9 riegos y en el RSA 12, la cantidad de agua de riego aplicada en el

RSNA es un 33% superior a la aplicada en el RSA (Tabla 4), debido a que las dosis de riego fueron inferiores en el RSNA. El uso de agua (*WU*) fue un 13.3% superior en el RSNA y la producción un 15.6% superior. La *WUE* en el RSNA fue un 12.3% superior que en el RSA.

En el RSA el déficit de agua (*Def*) fue del 35.1% mientras que en el RSNA fue del 26.5%, lo que presumiblemente redujo el máximo potencial de producción en ambos casos.

**Tabla 4.** Dosis de riego, precipitación efectiva (*Pe*), evapotranspiración del cultivo (*ETc*), uso de agua (*WU*), producción de grano al 14% de humedad (*Prod*), eficiencia en el uso del agua (*WUE*) y déficit de agua (*Def*) en cada uno de los tipos de riego.

Tipo	Dosis de Riego (mm)	<i>Pe</i> (mm)	<i>ETc</i> (mm)	<i>WU</i> (mm)	<i>Prod</i> (Mg ha <sup>-1</sup> )	<i>WUE</i> (kg/m <sup>3</sup> )	<i>Def</i> (mm)	<i>Def</i> (%)
RSA	139.7	206.7	534.08	346.4	8.09 <sup>A</sup>	2.334	187.5	35.1
RSNA	185.8			392.5	10.29 <sup>B</sup>	2.622	141.7	26.5

Nota: Los valores medios con distinta letra mayúscula son significativamente distintos a un nivel de significación  $p < 0.05$ .

En RSA la producción fue significativamente superior en la zona final del surco (Tabla 5). En RSNA se observó la misma tendencia aunque los resultados no fueron estadísticamente significativos. La mayor producción al final del surco es debida a que la lámina de agua infiltrada fue superior en esta zona, tal y como mostraron los resultados del código WinSRFR (Figura 2).

**Tabla 5.** Distribución de la producción de maíz en grano observada en cada posición a lo largo del surco y para cada tratamiento.

Distancia (m)	15	40	65	90	125
Producción RSA (Mg ha <sup>-1</sup> )	7.16±0.95 <sup>BC</sup>	6.54±1.62 <sup>C</sup>	7.42±1.02 <sup>BC</sup>	9.18±1.47 <sup>AB</sup>	10.14±1.79 <sup>A</sup>
Producción RSNA (Mg ha <sup>-1</sup> )	8.69 ±2.81 <sup>A</sup>	9.65±2.65 <sup>A</sup>	10.31±3.00 <sup>A</sup>	11.41 ±3.07 <sup>A</sup>	11.38±2.20 <sup>A</sup>

Nota: Los valores medios con distinta letra mayúscula son significativamente distintos a un nivel de significación  $p < 0.05$ . La separación de medias en cada posición se realizó para cada tratamiento.

### 3.5. Análisis de la distribución de agua en el suelo en RSNA y RSA. Aplicación del código HYDRUS

Debido a las bajas dosis de riego que se aplicaron y al tiempo transcurrido en tomar las medidas (entre 48 y 72 h) los contenidos de agua medidos con TDR apenas mostraron incrementos de agua después de los riegos, por ello se utilizó el código HYDRUS para analizar la dinámica de agua en el suelo en los dos sistemas. En las simulaciones se consideró el mismo contenido de agua inicial basado en las mediciones en campo del día 14 de agosto ( $0.120 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) y el mismo tiempo de oportunidad de 1.29 h. En la Figura 3, que muestra la distribución de agua en el suelo 4 días después de regar, se observa que en los dos sistemas la zona de influencia del riego es muy similar, no observándose un mayor movimiento lateral de agua en el RSA. En ambos sistemas los contenidos de agua simulados a una profundidad superior a 20 cm no presentan incrementos, coincidiendo con las medidas tomadas con TDR. La zona del caballón es la zona que presenta mayor sequedad en los dos sistemas de riego, lo que también se detectó a partir de las medidas con TDR.

El sello formado durante los riegos en la superficie del surco tuvo un efecto importante en la infiltración durante los riegos, ya que cuando no se consideró su efecto en las simulaciones se observaba que el agua se infiltraba a mayor profundidad de la que se detectó con las medidas experimentales.

## 4. CONCLUSIONES

El avance de agua durante los riegos en RSA tendió a ser más lento que en RSNA, lo que permitió alargar el tiempo de riego y mejorar la uniformidad de distribución. Sin embargo en RSA la dosis aplicada por hectárea en cada riego fue significativamente inferior, al ser el doble el volumen de suelo que debe humedecer cada surco regado. Por ello, se ha puesto en evidencia que para aplicar una dosis de riego

similar a lo largo de toda la campaña es preciso regar más a menudo con RSA, lo cual supone un inconveniente para el agricultor.

El modelo WinSRFR permitió determinar el perfil de infiltración a lo largo del surco, observando una mayor cantidad de agua infiltrada al final del surco que en su inicio, lo que teniendo en cuenta que se aplicó un riego deficitario supuso un aumento de la producción en la zona donde hubo más infiltración.

El modelo HYDRUS permitió analizar la distribución de agua en el plano perpendicular al surco teniendo en cuenta el efecto del sellado. Coincidiendo con las medidas experimentales, en los resultados de las simulaciones se observó que con las dosis de riego aplicadas sólo se humedecieron los primeros 20 cm de suelo y por lo tanto el riesgo de pérdidas de agua por percolación profunda fue mínimo.

La técnica del RSA en los suelos estudiados no supuso una mejora en la *WUE* ni un aumento de la producción de maíz.

## REFERENCIAS

- Abbasi, F., J. Feyen y M.T. van Genuchten, 2004. Two-dimensional simulation of water flow and solute transport below furrows: model calibration and validation. *J. Hydrol.*, 290 (1-2), 63-79.
- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes y M. Smith, 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper no. 56*, Rome, Italy.
- Arbat G., M. Duran-Ros, J. Puig-Bargués, J. Barragán y F. Ramírez de Cartagena, 2008. Evaluación del riego por superficie en la producción de planta ornamental en la Comunidad de Regantes Acequia Vinyals (Girona). *Congreso Internacional de Riego*. Zaragoza.
- Arbat, G., J. Puig-Bargués, M. Duran-Ros, J. Barragán y F. Ramírez de Cartagena, 2007. Distribución del agua en el suelo en riego por superficie: aplicación del código HYDRUS. En: *Estudios en la Zona no Saturada del Suelo VIII*, Córdoba.
- Cahoon, J. E., P. Mandel y D.E. Eisenhauer, 1995. Management recommendations for sloping blocked-end furrow irrigation. *Appl. Eng. in Agric.* 11(4), 527-533.
- Crevoisier, D., Z. Popova, J.C. Mailhol y P. Ruelle, 2008. Assessment and simulation of water and nitrogen transfer under furrow irrigation. *Agric. Water Manag.* 95(4), 354-366.
- Clemmens, A.J. y A.R. Dedrick, 1994. Irrigation techniques and evaluations. En: Tanji, K.K., Yaron, B. (Eds.), *Advances Series in Agricultural Sciences*, Springer, Berlin.
- Elliott, R.L. y W.R. Walker, 1982. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. *Trans. ASAE.* 25(2), 396-400.
- Graterol, Y.E., D.E. Eisenhauer y R. W. Elmore, 1993. Alternate-furrow irrigation for soybean production. *Agric. Water Manag.* 24(2), 133-145.
- Horst, M.G., S.S. Shamutalov, J.M. Gonçalves y L.S. Pereira, 2007. Assessing impacts of surge-flow irrigation on water saving and productivity of cotton. *Agric. Water Manag.* 87(2), 115-127.
- Horst, M.G., S.S. Shamutalov, L.S. Pereira y J. M. Gonçalves, 2005. Field assessment of the water saving potential with furrow irrigation in Fergana, Aral Sea basin. *Agric. Water Manag.* 77(1-3), 210-231.
- Kang, S.Z., Z.S. Liang, X.T. Hu, Y.H. Pan, P.Z. Shi y J. Zhang, 2000. Soil water distribution, uniformity and water-use efficiency under alternate furrow irrigation in arid areas. *Irrig. Sci.* 19(4), 181-190.
- Mailhol, J.C., D. Crevoisier y K. Triki, 2007. Impact of water application conditions on nitrogen leaching under furrow irrigation: Experimental and modelling approaches. *Agric. Water Manag.* 87(3), 275-284.
- Playán, E., 2008. Design, Operation, Maintenance and Performance Evaluation of Surface Irrigation Models. *Monografía de curso: Land and Water Resources Management*. Irrigated Agriculture. Instituto Agronomico Mediterraneo-CIHEAM. Bari, Italia.
- Ramos, B., 2005. Influència de l'aportació continuada de fems de bovi i de fertilitzant nitrogenat en el rediment i en el rentat de nitrogen nítric d'un cultiu de blat de moro en regadiu. *Projecte Final de Carrera d'Enginyer Agrònom*. ETSEA-UdL, Lleida.
- Ritchie, J.T., 1972. Model for predicting evaporation from row crop at incomplete cover. *Water Resour. Res.*, 8(5), 1204-1213.
- Rovira, L., 2005. El reg superficial per solcs al Baix Empordà: avaluació, diagnòstic i recomanacions. *Treball Final de Carrera d'Enginyeria Tècnica Agrícola*. Escola Politècnica Superior-UdG, Girona.
- Simunek, J., M. Sejna y M.T. van Genuchten, 2006. The HYDRUS Software package for simulating the two- and three-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media. U.S. Salinity Laboratory. Riverside, California.
- USDA. 2006. WinSRFR 2.1 Help & Manual – Draft. Surface Irrigation Analysis, Design & Simulation. USDA/ARS/Arid-Land Agricultural Research Center. Maricopa, Arizona.
- Valentin, C. y L.M. Bresson, 1992. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. *Geoderma*, 55, 225-245.
- Webber, H.A., C.A. Madramootoo, M. Bourgault, M.G. Horst, G. Stulina y D.L. Smith. 2006. Water use efficiency of common bean and green gram grown using alternate furrow and deficit irrigation. *Agric. Water Manag.* 86(3), 259-268.