

MODELO DE SIMULACIÓN DE RIEGO POR SURCOS INUNDADOS

Ana Sánchez García¹, Pilar García Navarro¹ y Enrique Playán Jubillar²

Resumen

El riego por surcos inundados consiste en asurcar una parcela de riego por inundación y permitir que el agua de riego se distribuya entre los surcos sin ninguna actuación de regulación por parte del regante. Este sistema de riego tiene un potencial de ahorro de agua frente al riego por inundación. Sin embargo, hasta la fecha no se ha abordado la simulación del sistema de surcos inundados ni una comparación entre ambos sistemas. En este trabajo se presenta el desarrollo de un modelo numérico del riego por surcos inundados. El modelo se basa en la disposición mallada de una serie de canales unidimensionales que se conectan mediante puntos de bifurcación o confluencia. El modelo propuesto puede convertirse en una valiosa herramienta para el diseño y el manejo de sistemas de riego por surcos inundados.

Palabras clave: Surcos inundados modelo numérico simulación McCormack características

INTRODUCCIÓN

En muchos lugares del mundo el riego por superficie es el sistema de riego más empleado, ocupando la inmensa mayoría de las tierras de regadío a nivel mundial. En zonas de clima semiárido con escasez de agua y un nivel tecnológico avanzado, como California, el riego por superficie todavía supera las dos terceras partes de la superficie de regadío (Hanson et al., 1995). Esta situación es similar para el caso de España.

Uno de los mayores avances en el riego por superficie en los últimos años ha sido la extensión del riego por inundación, que se caracteriza por regar parcelas de gran tamaño perfectamente niveladas (sin pendiente) y rodeadas por un dique (Dedrick et al., 1978). Aunque el riego por inundación generalmente consigue eficiencias muy elevadas, en algunos casos particulares puede aplicar dosis de riego excesivas. En estas condiciones, la utiliza-

ción del riego por inundación puede resultar dañina para el medio ambiente, ya que se utiliza más agua de la necesaria y se puede contaminar las aguas superficiales y subterráneas con importantes cantidades de sales, fertilizantes y agroquímicos. Una solución que se ha adoptado con frecuencia para paliar este problema consiste en asurcar el terreno de la parcela. Esta práctica constituye el sistema de riego por surcos inundados (Erie y Dedrick, 1979). Con este sistema se reduce drásticamente el volumen de agua que circula por encima de la parcela regada y se puede obtener una importante disminución del volumen de agua de riego usada.

Una de las herramientas habituales en el diseño y la gestión de los sistemas de riego por superficie es la modelización matemática. El desarrollo de modelos matemáticos que describen la realidad física y la evolución de los métodos numéricos que permiten resolverlos satisfactoriamente, hacen que las simulaciones sean el complemento ideal a las

¹ Área de Mecánica de Fluidos. CPS, Universidad de Zaragoza, María de Luna 3, 50015 Zaragoza. Telf.: 976 761 000 x5057 Fax: 976 761 882

² Estación Experimental de Aula Dei, CSIC. Apdo. 202. 50080 Zaragoza. Telf.: 976 716 087 Fax: 976 716 145 playan@eead.csic.es

Artículo recibido el 10 de enero de 2001, recibido en forma revisada el 6 de junio de 2001 y 15 de enero de 2002 y aceptado para su publicación el 7 de marzo de 2002. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

técnicas experimentales. Esto es debido a la rapidez y versatilidad de los modelos. Además, la modelización es en general más accesible que la preparación de las instalaciones experimentales, resultando a su vez en una ventaja económica importante.

A pesar de la importancia del sistema de riego por surcos inundados, y de su implantación a nivel mundial, no se dispone hasta la fecha de ningún modelo que permita su simulación. En este trabajo se ha desarrollado un modelo para simular el riego por surcos inundados basado en una red mallada de canales abiertos (modelo RSI). El flujo de agua se supone unidimensional y marcadamente transitorio. Las ecuaciones utilizadas constituyen el modelo de aguas poco profundas de St. Venant y se resuelven numéricamente mediante métodos explícitos. Los métodos numéricos elegidos para resolver el modelo matemático son el método de las características y el método de las diferencias finitas. Utilizando el modelo propuesto, se analizó un caso de estudio que representa una comparación cualitativa entre surcos inundados y riego por inundación.

EL RIEGO POR SUPERFICIE

El riego por superficie se caracteriza por el hecho de que el agua fluye por gravedad utilizando la superficie del terreno como sistema de distribución. El caudal de agua superficial disminuye a lo largo del terreno debido a la infiltración del agua en el suelo (Walker y Skogerboe, 1987). El principal objetivo del riego es proporcionar al cultivo el agua necesaria para que desarrolle sus procesos evapotranspirativos de forma satisfactoria. De esta manera se controlan además la acumulación de sales en el suelo y las pérdidas de agua. Es sabido que la idoneidad del riego depende de una serie de factores tales como el incremento del agua almacenada en la zona radicular del cultivo, las pérdidas por percolación profunda y por escorrentía superficial, la uniformidad de la lámina infiltrada o el déficit de humedad en el suelo después del riego.

Con el fin de comparar los distintos sistemas de riego, (Merriam y Keller, 1978) propusieron diversos índices de calidad del riego. De entre ellos, dos son de interés en este trabajo: la eficiencia de aplicación y la uniformidad de distribución.

La eficiencia de aplicación expresa el porcentaje del agua aplicada durante el riego que ha quedado almacenada en el suelo y a disposición de las plantas. La eficiencia de aplicación en un sistema

de riego se define como la relación porcentual entre la cantidad de agua almacenada en la zona radicular (disponible para la planta) y la cantidad de agua aportada por el sistema (Merriam y Keller, 1978).

$$E_a = \frac{\text{Volumen de agua retenida en la zona radicular}}{\text{Volumen de agua aplicada}} 100 \quad (1)$$

Un término importante a la hora de evaluar la eficiencia es la dosis requerida Z_R , que se define como la dosis de agua que se desea almacenar en la zona radicular a disposición de los cultivos. Es por ello que para poder establecer la eficiencia de aplicación es necesario cuantificar la dosis requerida. Esta dosis requerida varía de un tipo de suelo a otro según sus propiedades. Las dos variables de las que depende principalmente son la profundidad y la textura del suelo. Un suelo con poca profundidad requiere una dosis menor que un suelo más profundo. Una aplicación excesiva de agua en suelos que poseen una dosis requerida pequeña puede dar lugar a elevadas pérdidas por percolación profunda, disminuyendo considerablemente la eficiencia de aplicación. Además, los compuestos químicos que contiene el agua perdida por percolación profunda (sales de origen natural, fertilizantes y agroquímicos) podrían producir la contaminación de las aguas subterráneas o de los cursos superficiales. En general en el riego por superficie se aplican dosis de riego que exceden la dosis requerida, por lo que se considera una buena propiedad de un sistema de riego la capacidad de aplicar dosis de riego pequeñas. De esta manera el agua aplicada podrá ser aprovechada por los cultivos aún en suelos con baja capacidad de retención de agua.

La uniformidad de distribución expresa la variación espacial de la cantidad de agua infiltrada en la parcela. Este índice se puede expresar como:

$$UD = \frac{\bar{Z}_{25}}{\bar{Z}} 100 \quad (2)$$

donde \bar{Z}_{25} es la dosis media de infiltración en el 25% de la parcela menos regada y \bar{Z} es la dosis media en toda la parcela. La uniformidad de distribución es una condición necesaria para la eficiencia de aplicación. Sin embargo, es posible encontrar un riego muy uniforme que presente una eficiencia muy pobre. La calidad de un sistema de riego implica elevada eficiencia y uniformidad de aplicación.

A continuación se discuten las principales características de los sistemas de riego por superficie

que se van a analizar en este trabajo: el riego por inundación y el riego por surcos inundados.

Riego por inundación

El riego por inundación se realiza en un tablar sin pendiente ni desagüe que está rodeado por un dique o caballón. La forma del tablar es generalmente rectangular y su tamaño, muy variable, suele oscilar entre 0,3 y 3 ha. El agua es introducida por medio de acequias provistas de compuertas. El riego por inundación es un sistema de riego muy extendido en el mundo. En las últimas décadas se ha visto favorecido por la aparición de la nivelación guiada por láser, que permite disponer de parcelas de gran tamaño con una nivelación muy precisa. Esta técnica permite alcanzar elevada uniformidad y eficiencia con un bajo coste de mano de obra si los tablares son grandes y los caudales de riego elevados (Erie y Dedrick, 1979). En el riego por inundación se permite la entrada de agua a la parcela hasta que esté prácticamente cubierta de agua. Esta fase del riego se denomina de avance. En un momento dado (el tiempo de corte) se cierra la entrada de agua. Poco después la superficie del agua se vuelve horizontal, y la infiltración del suelo hace que el agua desaparezca de la superficie de la parcela. Esta segunda fase se llama de vaciado.

Riego por surcos inundados

En el riego por surcos inundados se aplica agua a una parcela nivelada, asurcada y confinada por diques. El agua se introduce por una única toma y avanza por un surco de distribución perpendicular a los surcos de riego. El agua avanza por los surcos de riego a distintas velocidades, pero al llegar al extremo aguas abajo puede circular a través de un segundo surco de distribución (Fig. 1). El confinamiento por medio de diques hace que el proceso de infiltración sea prácticamente estático una vez el agua cubre toda la superficie de la parcela y ya se ha cerrado la entrada de agua (vaciado).

Si el sistema está bien diseñado, además se pueden minimizar las pérdidas por percolación profunda. El punto clave para conseguirlo es hacer que el agua cubra toda la extensión de la parcela lo más rápidamente posible. De esta manera el agua dispondrá en todos los puntos de la parcela de tiempos de infiltración muy similares.

Aunque en el riego por surcos inundados se

utilizan caudales elevados, la dosis de riego aplicada suele ser menor que en otros sistemas de riego. El riego por surcos inundados es el sistema más aconsejable (dentro del riego por superficie) cuando se requieren dosis de aplicación pequeñas, como sucede en suelos de poca profundidad o con velocidades de infiltración reducidas.

En comparación con el riego por inundación, el riego por surcos inundados se caracteriza porque el volumen de agua almacenada sobre la superficie del suelo es mucho menor (Fig. 2). También es menor la superficie de contacto del agua con el suelo, por lo que el volumen de infiltración generalmente se reduce en el riego por surcos inundados respecto del riego por inundación. Como consecuencia de esto, el avance del agua es más rápido (para el mismo caudal) en el riego por surcos inundados que en el riego por inundación. Por ello, el sistema de surcos inundados tiene posibilidades de reducir la dosis de riego, con lo que la eficiencia puede aumentar sustancialmente. Estos aspectos han sido puestas de manifiesto en la literatura (Walker y Skogerboe, 1987), pero no han sido debidamente cuantificados hasta la fecha.

MODELOS NUMÉRICOS DEL RIEGO POR SUPERFICIE

En los últimos veinte años se han utilizado modelos para simular el riego por superficie (Kato-podes y Strelkoff, 1977; Walker y Skogerboe, 1987; Singh y Bhallamundi, 1996). Los modelos son útiles para reproducir la realidad a partir de una serie de simplificaciones y permiten resolver situaciones muy complejas. La simulación numérica permite la resolución de las ecuaciones diferenciales continuas que definen un proceso físico mediante su discretización en relaciones algebraicas expresadas en términos de diferencias finitas evaluadas en una serie de puntos representativos del dominio de estudio. El simulador permite el avance de la solución en el tiempo a través de su discretización en pasos temporales de valor generalmente variable.

Las ecuaciones que permiten describir el comportamiento del agua en el riego por superficie constituyen el modelo de Saint Venant de aguas poco profundas. La aplicación de ciertas hipótesis permite la utilización de modelos unidimensionales y bidimensionales basados en las ecuaciones de Saint Venant para la resolución del flujo de agua de riego en parcelas.

Modelos unidimensionales

Las ecuaciones unidimensionales son aplicadas con rigor en situaciones en las que el flujo de agua de riego se puede considerar unidimensional, es decir, el frente avanza en línea recta y se consideran despreciables los movimientos laterales del agua. En la literatura se citan cuatro tipos de modelos unidimensionales: el método de balance de volumen, el modelo de onda cinemática, el modelo de inercia nula y el modelo hidrodinámico (Walker y Skogerboe, 1987). Los tres primeros son simplificaciones del último modelo, que es el que alcanza mayor complejidad. En la actualidad, el avance tecnológico de los ordenadores ha favorecido el uso generalizado del modelo hidrodinámico, que resuelve el problema de modo más preciso. Las ecuaciones que constituyen el modelo hidrodinámico son:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + i = 0 \quad (3)$$

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{gA^2} \frac{\partial Q}{\partial x} + (1 - Fr^2) \frac{\partial h}{\partial x} = S_0 - S_f$$

Donde A es el área transversal mojada, Q es el caudal, i es la velocidad de infiltración, g es la aceleración de la gravedad, Fr es el número de Froude, h es el calado del agua, S_0 es la pendiente del terreno y S_f es la pendiente de fricción.

La velocidad de infiltración es la derivada temporal de la lámina de agua infiltrada, Z, que se calcula en función de tres parámetros, k, a y f_0 , que caracterizan el proceso de infiltración según la ecuación de Kostiakov-Lewis ($Z = k\tau^a + f_0\tau$). En esta ecuación la variable independiente es t, que se define como el tiempo de oportunidad, correspondiente al tiempo que un determinado nudo de cálculo lleva cubierto por agua.

Modelos bidimensionales

En ocasiones, el riego presenta características que impiden su simulación por medio de modelos unidimensionales. Esto sucede en casos de parcelas irregulares, cuando hay varios puntos de entrada de agua y, en general, cuando el flujo no se basa en corrientes paralelas. En estas situaciones se precisa de los modelos bidimensionales que introducen una nueva variable espacial a la resolución de las ecuaciones. Las ecuaciones se pueden escribir en función del calado (h) y dos componentes de la velocidad (u y v según el eje tomado):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uh) + \frac{\partial}{\partial y}(vh) + i = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(uh) + \frac{\partial}{\partial x}(u^2h) + \frac{\partial}{\partial y}(uvh) + g \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^2}{2} \right) - gh(S_{0x} - S_{fx}) - D_{ix} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(vh) + \frac{\partial}{\partial y}(v^2h) + \frac{\partial}{\partial x}(uvh) + g \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h^2}{2} \right) - gh(S_{0y} - S_{fy}) - D_{iy} = 0$$

El modelo bidimensional B2D fue desarrollado por Playán et al. (1994a; 1994b), y está diseñado para la simulación bidimensional del riego por inundación en parcelas de forma irregular niveladas y sin escorrentía. Este modelo puede utilizar varios puntos simultáneos o sucesivos de entrada de agua. El programa permite definir la forma de la parcela y determinar el tipo, la localización y las características de los puntos de entrada de agua.

Modelo de red mallada para el riego por surcos inundados (RSI)

El modelo numérico desarrollado en este trabajo para la simulación de riego en surcos inundados se basa en una red mallada de canales abiertos por donde circula el agua. En los canales se hace la hipótesis de que circula un flujo unidimensional de agua marcadamente transitorio y modelizable mediante las ecuaciones de Saint Venant. La unión de los surcos de distribución con los de riego da lugar a conexiones de dos o tres canales, según se hallen los surcos de riego en puntos extremos o intermedios de la parcela (Fig. 1).

En el esquema del problema se introduce un canal de acceso por donde se aplica el agua de riego. Se simplifica así el tratamiento numérico de la condición de contorno aguas arriba, que en caso contrario se situaría en una conexión de tres canales, y se facilita la distribución de agua de forma más natural, evitando innecesarias suposiciones en dicha conexión.

UN MODELO NUMÉRICO DEL RIEGO POR SURCOS INUNDADOS

Existen cuatro tipos de datos de entrada al modelo: datos geométricos, parámetros de infiltración, datos hidrodinámicos y parámetros numéricos de simulación.

La geometría de la parcela se introduce mediante el número de surcos de riego, el intervalo espacial Δx usado en la discretización de los surcos

de riego y distribución, y el número de nodos de cada tipo de surco. El surco de distribución se divide en tramos de forma que la distancia entre surcos de riego coincide con la longitud de cada tramo de surco de distribución. Las dimensiones de la parcela son fácilmente calculables a partir de todos estos datos. En el modelo, la sección transversal de los surcos es trapezoidal. La sección de un trapecio regular se caracteriza por medio de la pendiente de los lados y por la anchura de la base menor del trapecio. El modelo contempla la posibilidad de asignar distintos valores de estas variables para cada tipo de canal. El proceso de infiltración ocurre tanto en los surcos de distribución como en los surcos de riego. El canal de acceso se supone construido de un material impermeable, por lo que no presenta ni pérdidas de agua ni infiltración.

Además de los datos geométricos y los parámetros de infiltración, los datos que caracterizan el problema son el caudal de riego aplicado y el coeficiente de rugosidad de Manning. Otra variable hidrodinámica muy importante es la pendiente del fondo de los canales. Por definición del sistema de surcos inundados la parcela está nivelada, por lo que se fija un valor nulo de pendiente.

Los parámetros numéricos más influyentes en el tiempo de cálculo y en la estabilidad y convergencia del método son el intervalo espacial Δx y intervalo temporal Δt . Este último se controla a través de la condición de Courant-Friedrichs-Lewy, que permite definir un número adimensional CFL que gobierna la estabilidad numérica. En el programa se considera un CFL fijo y un Δt variable.

Una vez introducidos los datos que caracterizan el problema y el proceso de cálculo, el programa avanza la solución en la red de canales a partir de unos valores iniciales de caudal y calado nulos, correspondientes a una parcela seca. La simulación del avance de agua en el sistema de surcos inundados se realiza mediante la aplicación del modelo hidrodinámico hasta que el agua cubre todos los nodos del dominio. En ese momento se corta el agua de riego y se aplica el método de Newton-Raphson para calcular el tiempo necesario para que se infiltre toda el agua. La aplicación de este método se basa en la suposición de que una vez se ha cubierto de agua todo el terreno, el proceso de infiltración es prácticamente estático. Por tanto, a partir de este momento no es necesario aplicar un modelo de flujo transitorio.

En el punto de entrada se impone la condición

de que el calado sea ligeramente superior al calado crítico ($1,05 \cdot h_c$) para evitar que el flujo entre en régimen supercrítico. El calado crítico es el valor del calado correspondiente a un flujo crítico ($Fr=1$). En la práctica, el calado crítico h_c se calcula a partir de la expresión:

$$Fr = \frac{u}{c} = 1 \Rightarrow \frac{Q}{A(h_c)} = \sqrt{g \frac{A(h_c)}{b(h_c)}} \quad (5)$$

en la que u es la velocidad del agua, c es la velocidad de las ondas superficiales, y b es la anchura de la superficie libre.

El modelo verifica en cada intervalo de tiempo el cumplimiento del balance de masa. Para ello se calculan las siguientes variables:

- Variación del volumen de agua en el dominio durante el tiempo de simulación:

$$V_{final} = \sum_{j=1}^N A_j \Delta x + \sum_{j=1}^N Z_j \Delta x \quad (6)$$

Donde el subíndice j recorre el número total de nudos de cálculo.

- Diferencia de volumen de agua que entra y sale al dominio en el tiempo de simulación. Este término se calcula como el producto del caudal de riego por el tiempo de simulación:

$$V_{entra} = T Q_{aplicado} \quad (7)$$

Donde T es el tiempo de simulación.

- Error de conservación de masa, calculado como:

$$error = \left(1 - \frac{V_{final}}{V_{entra}} \right) 100 \quad (8)$$

Esquema numérico del modelo de riego por surcos inundados

Para la resolución en los puntos interiores se utilizó el esquema de McCormack. Se trata de un esquema explícito en diferencias finitas de segundo orden de precisión en espacio y tiempo que se caracteriza por su capacidad para tratar flujos que varían tanto lenta como rápidamente. El fundamento del método consiste en calcular la solución numérica de las variables en cada punto a partir de la in-

formación obtenida de los puntos vecinos en el paso temporal anterior.

El esquema de McCormack se aplica a ecuaciones hiperbólicas en forma conservativa del tipo:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} + H(U, x, t) = 0 \quad (9)$$

La secuencia predictor-corrector permite el paso de hasta para obtener la siguiente discretización:

$$\begin{aligned} U_j^p &= U_j^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} [F_{j+1}^n - F_j^n] - \Delta t \cdot H_j^n \\ U_j^c &= U_j^p - \frac{\Delta t}{\Delta x} [F_j^p - F_{j-1}^p] - \Delta t \cdot H_j^p \\ U_j^{n+1} &= \frac{1}{2} (U_j^p + U_j^c) \end{aligned} \quad (10)$$

La aplicación de este método a las ecuaciones (3) ha sido descrita por García Navarro y Savirón (1992).

En esquemas explícitos la restricción del CFL impuesta sobre el paso temporal se puede relajar discretizando el término de fricción S_f de forma semi-implícita:

$$(S_f)_j = \left(\frac{|Q|n^2}{A^2 R^{4/3}} \right)_j^n [\alpha Q_j^n + (1-\alpha) Q_j^{n+1}] \quad \dots \quad (11)$$

con $0 \leq \alpha \leq 1$

Donde a es el grado de implícitud del esquema numérico y puede variar entre los valores 1 (explícito) y 0 (implícito), n es el coeficiente de Manning, y R es el radio hidráulico.

Condiciones de contorno

Tanto el esquema de McCormack como otros métodos explícitos permiten avanzar la solución numérica un paso temporal en todos los puntos interiores del mallado a partir de la información procedente de los puntos vecinos. Sin embargo, esto no es aplicable para puntos situados en los extremos aguas arriba y aguas abajo ya que debido a su posición, tan sólo cuentan con puntos a la derecha o a la izquierda. En la simulación de flujo en canales abiertos existe un conjunto de situaciones donde no es posible la resolución mediante la aplicación de las ecuaciones de flujo estacionario de St Venant.

Una de ellas es la confluencia (o bifurcación) de corrientes.

En la red de canales considerada nos encontramos con dos tipos de contorno: uno correspondiente al punto por el cual se introduce todo el caudal de agua de riego, y un segundo tipo que permite tratar las confluencias de dos o tres corrientes. Debido a su distinta naturaleza cada tipo requiere un tratamiento particular.

Entrada del caudal aguas arriba

El régimen del flujo determina el número de condiciones de contorno requeridas. Para flujo subcrítico es preciso dar una condición adicional ($h=h(t)$, $Q=Q(t)$ ó $Q=Q(h)$). La otra se obtiene resolviendo una ecuación diferencial basada en la forma característica de las ecuaciones de flujo:

$$\begin{aligned} \frac{DQ}{Dt} + b(h) \left(-\frac{Q}{A} \pm \sqrt{g \frac{A}{b(h)}} \right) \frac{Dh}{Dt} = \\ = gA(S_0 - S_f) + \left(\frac{3}{2} \frac{Q}{A} \mp \sqrt{g \frac{A}{b(h)}} \right) i \end{aligned} \quad (12)$$

La primera ecuación corresponde a la curva característica positiva C_+ y la segunda a la negativa C_- , que es la utilizada para los extremos situados aguas arriba.

Puesto que se va a usar una red fija en el tiempo, el método original de las características ha de ser sustituido por una interpolación espacial adecuada como la basada en el método de Hartree (García-Navarro y Savirón, 1993) y un proceso iterativo hasta obtener la precisión deseada. La discretización de la ecuación (12) completa la información dada por la condición de contorno adicional. Así se dispondrá de un sistema de dos ecuaciones fácilmente resoluble. En el caso de estudio la condición añadida es el caudal entrante Q_p , con lo que el calado h_p se obtiene de forma inmediata por simple sustitución.

Confluencia o bifurcación de corrientes

En la red de canales estudiada existen dos tipos de confluencia: de dos y de tres corrientes. Para describir el tratamiento de este problema se suponen dos corrientes que confluyen en una tercera (Fig. 3). Se consideran los puntos P_1 , P_2 y P_3 situa-

dos en los extremos de los canales a los que pertenecen. P_1 y P_2 constituyen un contorno aguas abajo para los tramos 1 y 2, mientras que P_3 es un contorno aguas arriba. Encontrar la solución en estos puntos en cada paso temporal supone resolver seis incógnitas: tres caudales Q_1 , Q_2 y Q_3 , y tres calados h_1 , h_2 y h_3 , por lo que son necesarias 6 relaciones para resolver el flujo en la confluencia.

Abbot (1992) y Chow (1959) propusieron el uso de la discretización en diferencias finitas de la ecuación de conservación de la masa para cada punto del contorno.

En la discretización de la ecuación de la conservación de la masa:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = -i \quad (13)$$

la derivada espacial del caudal se expresa de forma distinta según se trate de un extremo aguas arriba o aguas abajo (Fig. 5). Para aguas arriba se tiene:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{Q_S - Q_M}{\Delta x} \quad (14)$$

mientras que para aguas abajo la derivada espacial es:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{Q_M - Q_S}{\Delta x} \quad (15)$$

Sustituyendo (14) o (15) y discretizando el resto de los términos la ecuación (13) queda:

$$b(h) \frac{h_M^{n+1} - h_M^n}{\Delta t} + \frac{Q_S^{n+1} - Q_M^{n+1}}{\Delta x} = -i \quad (16)$$

Se obtiene así un número fijo de ecuaciones que da lugar a una elección constante de 3 relaciones de compatibilidad. Una de ellas será siempre la conservación de la masa en la confluencia, que se expresa de forma distinta según se trate de una confluencia o una bifurcación (Fig. 4):

$$\beta_1 Q_1^{n+1} + \beta_2 Q_2^{n+1} + \beta_3 Q_3^{n+1} = 0 \quad (17)$$

donde $\beta_i = 1$ cuando el extremo del tramo i está aguas abajo y $\beta_i = -1$ si está aguas arriba.

Todavía quedan dos grados de libertad para plantear las dos relaciones que hacen falta. Así, los autores citados más arriba proponen igualdad de calados en la confluencia:

$$h_1^{n+1} = h_2^{n+1} = h_3^{n+1} \quad (18)$$

Es fácil obtener la ecuación que permite definir el caudal en un punto extremo situado aguas arriba como función del calado común h y valores conocidos en el punto contiguo en el momento actual de cálculo:

$$Q_M^{n+1} = b \frac{\Delta x}{\Delta t} (h_M^{n+1} - h_M^n) + Q_S^{n+1} \quad (19)$$

o bien:

$$Q_M^{n+1} = C_A h_M^{n+1} + C_B \quad (20)$$

donde:

$$C_A = b(h) \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad C_B = Q_S^{n+1} - b(h) \frac{\Delta x}{\Delta t} h_M^n \quad (21)$$

De forma similar se obtiene la expresión para el caudal en un punto situado aguas abajo:

$$Q_M^{n+1} = C'_A h_M^{n+1} + C'_B \quad (22)$$

donde:

$$C'_A = -b(h) \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad C'_B = Q_S^{n+1} + b(h) \frac{\Delta x}{\Delta t} h_M^n \quad (23)$$

Para ilustrar el método de cálculo empleado se consideran una confluencia y una bifurcación según se muestra en la Fig. 4. La ecuación (13) queda:

$$Q_{M1} \pm Q_{M2} - Q_{M3} = 0 \quad (24)$$

donde el signo positivo corresponde a la confluencia y el negativo a la bifurcación.

Sustituyendo cada Q_{Mi} según M_i sea un extremo aguas arriba o aguas abajo e imponiendo la condición de igualdad de calados (Eq. 14) se llega a una expresión que permite calcular el calado común en el tiempo $n+1$.

$$h_M^{n+1} = h_M^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} (Q_{S1} - Q_{S3} \pm Q_{S2}) \quad (25)$$

Una vez calculado este valor Q_{M1} , Q_{M2} y Q_{M3} se obtienen por simple sustitución a partir de sus ecuaciones correspondientes.

APLICACIÓN DEL MODELO A UN CASO DE ESTUDIO

Características del caso de estudio

Uno de los objetivos de este trabajo es establecer una comparación cualitativa entre el riego por

surcos inundados y el riego por inundación. Para ello, se realizaron simulaciones con el modelo hidrodinámico RSI desarrollado para surcos inundados y el modelo bidimensional B2D para riego por inundación. Estas simulaciones se realizaron para un caso base y para varios casos derivados de él consistentes en modificar alguna de sus variables.

Se decidió caracterizar la infiltración mediante la aplicación de ecuaciones estándar. Las familias texturales escogidas se tomaron de la clasificación realizada por el Soil Conservation Service del Departamento de Agricultura de Estados Unidos, adaptadas a la ecuación de Kostiaikov (Sritharan, 1992). Se eligió para el caso base un suelo de textura franco arcillosa, con las características de infiltración correspondientes a la familia 0,50 (Tabla 1).

Es importante destacar que en este estudio se usa una misma ecuación de infiltración para tablares y para surcos inundados. Sin embargo, las diferencias en los procesos de infiltración en surcos y tablares (Figura 2) hacen que en un mismo suelo los parámetros de infiltración puedan tomar valores diferentes en cada caso. Por otro lado, los parámetros de infiltración en surcos resultan ser dependientes del perímetro mojado del surco. Por todo esto, las conclusiones que se derivan de este caso de estudio deben considerarse provisionales hasta que este tema se aborde con el debido rigor experimental. En estas condiciones la comparación entre RSI y B2D sirve para ilustrar la capacidad predictiva de ambos modelos, para caracterizar las diferencias que el asurcado de la parcela genera en la distribución espacial del agua infiltrada, y finalmente para establecer hipótesis acerca de las condiciones en las que un sistema de riego resulta más interesante que el otro.

Se eligió para el coeficiente de fricción de Manning un valor de 0,04, típico del riego por surcos y del riego en tablares con suelo sin vegetación (Walker y Skogerboe, 1987). Los parámetros numéricos utilizados en la simulación unidimensional en el modelo RSI fueron un intervalo espacial Δx de 0,5 m, un CFL de 0,85 e implicitud total ($\alpha = 0$). El calado umbral a partir del cual comienza el proceso de infiltración se fijó en 10^{-4} m. En todos los casos de estudio, estos parámetros aseguraron la estabilidad y convergencia del modelo.

Las simulaciones se llevaron a cabo en una parcela de 60 m de ancho por 90 m de largo. En el caso de riego por surcos inundados los surcos de riego se dispusieron paralelos al lado de 60 m. Se

utilizó una separación entre surcos de 1,5 m, por lo que se usaron 60 surcos de riego. La sección de los surcos es trapezoidal. Los valores de pendiente lateral y de base menor de los surcos de riego fueron de 0,6 y 0,13 m respectivamente. La base de los surcos de distribución es cuatro veces la de los surcos de riego, es decir 0,52 m, y su talud es de 0,6, al igual que en los surcos de riego. El caudal unitario es de 1 Ls^{-1} , por lo que se usó un caudal total de 60 Ls^{-1} tanto en riego por surcos inundados como en riego por inundación.

Para evaluar la idoneidad de riego de los dos sistemas estudiados se utilizó la uniformidad de distribución. No resultó posible utilizar la eficiencia de aplicación al no conocer el valor de ZR. Por ello, se evaluó la capacidad de cada sistema para dar riegos ligeros con la dosis de riego media. Otros parámetros estudiados fueron el volumen de agua de riego, el tiempo de corte (coincidente con el tiempo de avance) y el tiempo de receso del agua, que comprende desde el inicio del riego hasta el momento en que el agua desaparece por completo de la superficie.

Resultados numéricos

Los resultados del caso base según el modelo B2D para riego por inundación y según el modelo desarrollado para surcos inundados se muestran en la Tabla 2. Se observa que la dosis media y el volumen aplicado son más bajos en el riego por surcos inundados que en el riego por inundación, al igual que sucede con el tiempo de corte y el tiempo de receso. La uniformidad es mayor en surcos inundados que en inundación. Estos datos no permiten obtener conclusiones cuantitativas sobre la bondad relativa de ambos sistemas de riego, ya que se ha analizado un caso particular basado en la hipótesis de que ambos sistemas de riego se pueden caracterizar por una única ecuación de infiltración.

Historia del calado y de la lámina infiltrada en riego por surcos inundados

Para comprender cómo se distribuye el agua a través de la red de canales en el riego por surcos inundados se tomaron resultados de calado y de lámina infiltrada en los nudos de los surcos de riego para dos instantes de tiempo. La evolución del calado se muestra en la Figura 6, mientras que la evolución de la lámina infiltrada se muestra en la figura 7. En estas figuras se representan el calado (m) o la lámi-

na infiltrada (m^3/m) en 30 de los 60 surcos de riego, tomados intermitentemente para cubrir la totalidad de la parcela. Los surcos de riego vienen numerados en el eje y con la letra "S" delante de cada uno de ellos. En el eje y se representa la distancia desde el inicio hasta el final de cada surco. El caudal de agua es aplicado en el surco S1 a una distancia de 0 m al inicio del surco. Este punto se corresponde con el punto de máximo calado y lámina infiltrada en las dos subfiguras 6 (esquina izquierda del fondo). El calado varía entre 0,0 y 0,2 m y aumenta muy lentamente en cada surco de riego una vez ha pasado el frente. La lámina infiltrada toma valores máximos de 0,03 durante la fase de avance. Se observa para cada surco que el valor mínimo de lámina infiltrada se alcanza en los puntos intermedios, donde los tiempos de oportunidad son menores. Al cabo de cierto tiempo la lámina infiltrada tiende a uniformizarse en todos los puntos del surco.

Distribución espacial del caudal en el momento del tiempo de corte en riego por surcos

La Figura 8 muestra un mapa de curvas de nivel del caudal en cada punto de la parcela en el momento del tiempo de corte del agua de riego, al final del periodo hidrodinámico de la simulación. El signo positivo indica caudales en dirección decreciente en el eje y. El signo negativo indica caudales en dirección ascendente en el eje y. El punto de entrada del agua es el (0, 60) y ahí el caudal tiene un sentido positivo (descendente). En los primeros 18 m del eje x el caudal toma valores positivos y decrecientes en intensidad. A partir de esa distancia, la circulación de agua por el segundo surco de distribución (situado en la recta $y=0$) da lugar a dos frentes de agua de sentidos contrarios y de intensidad similar. Desde una distancia de 20 m la distribución espacial es prácticamente simétrica: caudales positivos (descendentes) en la mitad superior y caudales negativos (ascendentes) en la mitad inferior. El eje de simetría toma un valor nulo de caudal y se encuentra situado en el punto medio de la anchura de la parcela.

Distribución espacial de lámina infiltrada en el momento final

En la figura 9 se muestran gráficas de curvas de nivel de la lámina infiltrada según el modelo RSI y el modelo B2D. En líneas generales se observa que las dosis medias finales son mayores en

el riego por inundación que en el riego por surcos inundados. Es importante hacer notar que la escala de colores utilizada es la misma en ambas figuras, lo que permite una adecuada comparación visual.

Otro aspecto importante es la desigual distribución espacial en los dos sistemas de riego. En el riego por surcos inundados se observa una cierta simetría a partir de los 18 m, tal y como se vio en la distribución espacial de caudales. Los valores máximos de lámina infiltrada se alcanzan en los extremos de cada surco de riego debido a la circulación del agua por los surcos de distribución. Los valores mínimos se alcanzan en los puntos intermedios de los surcos de riego. De nuevo se comprueba que las dosis medias disminuyen en la dirección de la longitud de la parcela.

ANÁLISIS CUALITATIVO DE RESPUESTA DEL AHORRO DE AGUA FRENTE A ALGUNOS PARÁMETROS DEL MODELO

Diversos autores han puesto de relevancia que el riego por surcos inundados presenta un potencial de ahorro de agua frente al riego por inundación. La diferencia en la práctica entre los dos sistemas de riego es únicamente el asurcado del terreno, por lo que el paso de uno a otro sistema resulta rápido y económico para los agricultores. Esta posibilidad justifica una prospección de las condiciones en las que el riego por surcos inundados puede suponer un cierto ahorro de agua de riego. Este estudio se abordó por medio de simulaciones en las que se usaron como variables algunos de los parámetros que definen el caso base. Las variables estudiadas fueron:

- la geometría del surco de distribución,
- las características de infiltración y el coeficiente de Manning del suelo,
- el caudal aplicado,

Para el estudio de la infiltración se usaron tres tipos de suelos de texturas arcillosa, franco arcillosa (el del caso base) y franco arenosa (Tabla 1). De nuevo, la misma ecuación fue usada para los dos sistemas de riego, lo que resta valor cuantitativo a las comparaciones.

Influencia del tamaño del surco de distribución

La variable seleccionada para estudiar el efecto del tamaño del surco de distribución fue la an-

chura de la base. Para llevar a cabo este estudio se eligieron cinco valores que van desde una anchura igual a la del surco de riego hasta cinco veces mayor. En la Tabla 3 se presentan los resultados de la simulación numérica. La observación más destacable es que la lámina infiltrada media es menor cuanto mayor es el tamaño del surco de distribución. Estos cinco casos de estudio se comparan con la simulación del caso base para el riego por inundación (Tabla 2). Cuando el surco de distribución tiene una anchura superior al doble de la anchura del surco de riego (0,26 m), el sistema de surcos inundados presenta una dosis infiltrada media inferior a la del riego por inundación. El volumen de agua aplicada, el tiempo de corte y el tiempo de receso varían con la anchura del surco de distribución de forma similar a la lámina infiltrada media. La explicación se basa en que cuanto mayor es la diferencia entre la sección de los surcos de distribución y la de los surcos de riego, mayor es la proporción de agua que fluye hacia el surco de distribución en cada confluencia. El agua avanza más rápidamente por el surco de distribución y por tanto tarda menos tiempo en cubrir la parcela. Sin embargo, no todo son ventajas cuando se aumenta el tamaño del surco de distribución: la uniformidad de distribución disminuye ligeramente. Esto parece ser debido directamente a la disminución de la dosis media.

Puesto que la anchura del surco de distribución se ha identificado como una variable de particular relevancia, en los apartados siguientes (en los que se analiza el efecto de la infiltración, la rugosidad y el caudal de riego) se analiza al mismo tiempo el efecto de dos anchuras del surco de distribución.

Influencia del coeficiente de Manning y de la infiltración

Se realizaron simulaciones en las que se consideraron tres factores. Para la anchura del surco de distribución se consideraron dos valores de 0,26 y 0,52 m. Para la n de Manning se simularon tres niveles de 0,04, 0,08 y 0,15. Finalmente, para la infiltración se consideraron las tres familias descritas en la Tabla 1. La figura 10 muestra un diagrama de dispersión para los valores de lámina infiltrada media obtenida en cada uno de los 18 casos resultantes. En la figura, los símbolos que se sitúan por debajo de la diagonal se corresponden con casos en los que el sistema de surcos inundados podría resultar ventajoso frente al riego por inundación (desde el punto de vista de disminuir la lámina media

infiltrada). Los casos en los que se usa un surco de distribución de 0,52 m podrían resultar ventajosos frente al riego por inundación, mientras que el surco de 0,26 sería bastante similar al riego por inundación. El efecto de la n de Manning resulta indiferente a la hora de identificar el mejor sistema de riego. En cuanto a la infiltración, se observa que la ventaja del sistema de surcos inundados podría ser relevante para los suelos de elevada infiltración, en los que este sistema de riego parece muy adecuado para mostrar su potencial de ahorro de agua.

Influencia del caudal unitario

En la Figura 11 se presenta un análisis similar al del apartado anterior. En este caso, las variables consideradas son el caudal unitario, la anchura del surco de distribución y la familia de infiltración. Los valores empleados para el caudal unitario oscilan entre 0,5 y 3 L s⁻¹. En cuanto a la infiltración, se consideran únicamente las familias 0,2 y 0,5. De nuevo son los surcos de distribución con anchura de 0,52 m los que podrían superar en eficiencia al riego por inundación. Las ventajas más importantes aparecen para la combinación de los caudales más bajos y la infiltración más elevada. Estas condiciones son particularmente difíciles para el riego por inundación, pero parece que pueden ser manejadas muy satisfactoriamente por el riego por surcos inundados.

CONCLUSIONES

El modelo numérico desarrollado en este trabajo ha sido capaz de simular satisfactoriamente el riego por surcos inundados en una variedad de casos de estudio. El esquema de segundo orden de McCormack resultó conveniente para los puntos interiores incluso en la zona del frente de avance, que representa una discontinuidad y que habitualmente es una zona conflictiva. La estabilidad del modelo se aseguró mediante la elección de un CFL igual a 0,85. El término de fricción se discretizó de forma implícita y el calado umbral para el inicio de la infiltración se fijó en 10-4 m. La evaluación del modelo se ha realizado en base a la caracterización de una serie de casos de estudio. Sin embargo, para poder establecer su capacidad predictiva con rigor será necesaria la realización de estudios experimentales. De esta manera se podrá verificar el correcto funcionamiento del modelo y se obtendrán ecuaciones de infiltración específicas para cada sistema de riego. El análisis de los casos de estudio ha

revelado que la anchura del surco de distribución es el parámetro más determinante de entre los estudiados a la hora de determinar las condiciones en las que el riego por surcos inundados puede suponer un ahorro de agua frente al riego por inundación. Es por ello que se recomienda que en los sistemas de riego por surcos inundados se conceda importancia a los surcos de distribución, asegurando que tienen capacidad para transportar una buena parte del caudal total de riego. Los resultados de los casos de estudio sugieren que cuando la infiltración es elevada y los caudales de riego son bajos, el riego por surcos inundados puede resultar una alternativa potencialmente eficiente frente al riego por inundación.

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Coefficiente de implicitud del término de fricción en el esquema numérico.
β	Coefficiente de asignación de sentido del flujo en confluencias y bifurcaciones
τ	Tiempo de oportunidad para la infiltración
A	Área de la sección transversal del flujo
a	Exponente de la ecuación de infiltración de Kostiakov-Lewis
b	Anchura de la superficie libre del flujo
c	velocidad de las ondas superficiales
CFL	Coefficiente de Courant-Friedrichs-Lewy
D_{ix}	Término de transferencia de momento asociado a la infiltración en el eje x
D_{iy}	Término de transferencia de momento asociado a la infiltración en el eje y
E_a	Eficiencia de aplicación del riego
F	Elemento vectorial de flujo de una ecuación hiperbólica genérica
Fr	Número de Froude
f₀	Coefficiente de la ecuación de infiltración de Kostiakov-Lewis
g	Aceleración de la gravedad
H	Elemento vectorial de término fuente de una ecuación hiperbólica genérica
h	Calado del flujo
h_c	Calado crítico
i	Velocidad de infiltración
k	Coefficiente de la ecuación de infiltración de Kostiakov-Lewis
n	Coefficiente de rugosidad de Manning
Q	Caudal
R	Radio hidráulico
S₀	Pendiente del terreno en la dirección principal del movimiento
S_{0x}	Pendiente del terreno en la dirección del eje x
S_{0y}	Pendiente del terreno en la dirección del eje y
S_f	Pendiente de fricción en la dirección principal del movimiento

S_{fx}	Pendiente de fricción en la dirección del eje x
S_{fy}	Pendiente de fricción en la dirección del eje y
t	Tiempo
U	Elemento vectorial de variables conservadas en una ecuación hiperbólica genérica
u	Velocidad del flujo en la dirección del eje x
UD	Uniformidad de distribución
V	Volumen de agua
v	Velocidad del flujo en la dirección del eje y
x	Coordenada espacial
Z	Dosis infiltrada
Z̄	Dosis media infiltrada
Z̄₂₅	Dosis media infiltrada en el 25% menos regado del área de la parcela
Z_R	Dosis de riego que se desea aplicar

REFERENCIAS

- ABBOTT, M. B., 1992. Computational hydraulics. Ashgate, UK, 326 pp.
- CHOW, V. T., 1959. Open-channel hydraulics. McGraw-Hill, Tokio. 680 pp.
- DEDRICK, A. R., REPLOGLÉ, J. A., ERIE, L. J., 1978. On-farm level-basin irrigation - save water and energy. Civil Engineering, 48(1),60-65.
- ERIE, L. J., DEDRICK, A. R., 1979. Level basin irrigation: A method for conserving water and labor. USDA Farmers' Bulletin, 2261,23.
- GARCÍA-NAVARRO, P., SAVIRÓN, J. M., 1992. McCormack's method for the numerical simulation of one-dimensional discontinuous unsteady open channel flow. J. Hydr. Res., 30(1),95-105.
- GARCÍA-NAVARRO, P., SAVIRÓN, J. M., 1993. Numerical simulation of unsteady flow at open channel junctions. J. Hydr. Res., 30,595-609.
- HANSON, B., BOWERS, W., DAVIDOFF, B., KASAPLIGIL, D., CARVAJAL, A., BENDIXEN, W., 1995. Field performance of microirrigation systems. En: Microirrigation for a changing world: Conserving resources/Preserving the environment. Proc., Fifth Int'l. Microirrigation Congress., (Eds.). Orlando, Florida. 986.
- KATOPODES, N. D., STRELKOFF, T., 1977. Hydrodynamics of border irrigation - complete model. ASCE J. Irrig. Drain. Div., 103(IR3),309-323.
- MERRIAM, J. L., KELLER, J., 1978. Farm irrigation system evaluation: a guide for management. Utah State University, Logan, Utah. 271 pp.
- PLAYÁN, E., WALKER, W. R., MERKLEY, G. P., 1994a. Two-dimensional simulation of basin irrigation. I: Theory. ASCE J. Irrig. Drain. Div., 120(5),837-856.
- PLAYÁN, E., WALKER, W. R., MERKLEY, G. P., 1994b. Two-dimensional simulation of basin irrigation. II: Applications. ASCE J. Irrig. Drain. Div., 120(5),857-870.
- SINGH, V., BHALLAMUNDI, S. M., 1996. Complete hydrodynamic border-strip irrigation model. ASCE J. Irrig. Drain.

Div., 122(4),189-197.
 SRITHARAN, S. I., 1992. Equivalent Kostiakov parameters for SCS infiltration families. ASCE J. Irrig. Drain. Div., 118(1),192-197.

WALKER, W. R., SKOGERBOE, G. V., 1987. Surface irrigation. Theory and practice. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. 386 pp.

TABLAS

Tabla 1. Familia de infiltración y parámetros de Kostiakov-Lewis correspondientes a los suelos de estudio (Fuente: Soil Conservation Service del USDA).

Familia	Textura	k (m ³ m ⁻¹ min ^{-a})	a	f ₀ (m ³ m ⁻¹ min ⁻¹)
0,20	Arcilloso	0,00346	0,388	0,000057
0,50	Franco arcilloso	0,00320	0,504	0,000117
1,00	Franco arenoso	0,00332	0,598	0,000212

Tabla 2. Resultados del caso base para los dos sistemas de riego.

Variable	Riego por inundación	Riego por surcos inundados
Volumen aplicado (m ³)	255,9	212,2
Dosis media (mm)	47,8	39,3
Tiempo de corte (min)	71,1	58,9
Tiempo de receso (min)	211	138
Uniformidad de Distribución (%)	82,9	85,7
Error de simulación (%)	0,86	5,21

Tabla 3. Influencia del tamaño del surco de distribución en el riego por surcos inundados, y comparación con el caso base de riego por inundación.

Base del surco (m)	Volumen de riego (m ³)	Lámina infiltrada media (mm)	Tiempo de corte (min)	Tiempo de receso (min)	Uniformidad de distribución (%)	Error (%)
0,13	360,8	66,8	100,2	286	93,8	2,97
0,26	277,9	51,4	77,2	201	86,8	3,94
0,39	236,6	43,8	65,7	161	86,1	4,62
0,52	212,2	39,2	58,9	138	86,7	5,21
0,65	196,2	36,3	54,5	124	85,1	5,74

FIGURAS

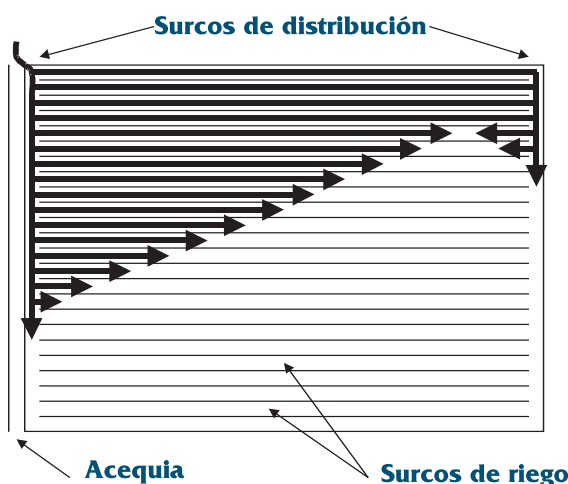


Figura 1. Esquema del sistema de riego por surcos inundados, en el que se detallan los surcos de riego y los surcos de distribución del agua de riego.

MODELO DE SIMULACIÓN DE RIEGO POR SURCOS INUNDADOS

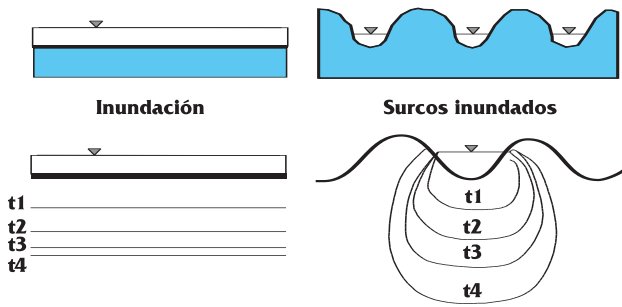


Figura 2. Volumen de agua superficial (arriba) y evolución de la infiltración en el suelo (abajo) en el riego por inundación y en el riego por surcos inundados a lo largo de cuatro intervalos de tiempo.

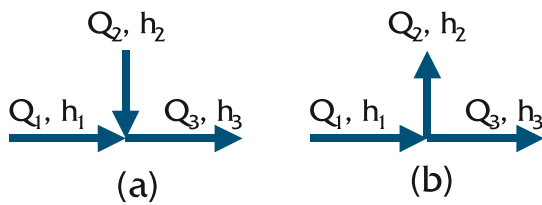


Figura 4. Discretización de: (a) confluencia, (b) bifurcación.

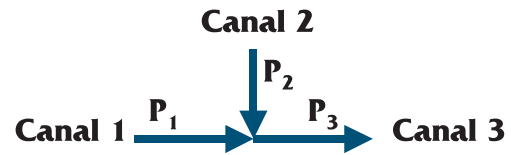


Figura 3. Esquema empleado para la confluencia de corrientes.

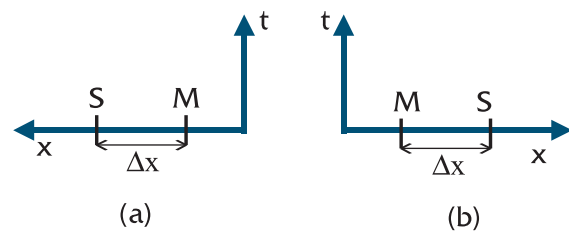


Figura 5. Discretización de la derivada espacial. (a) Aguas abajo; (b) Aguas arriba.

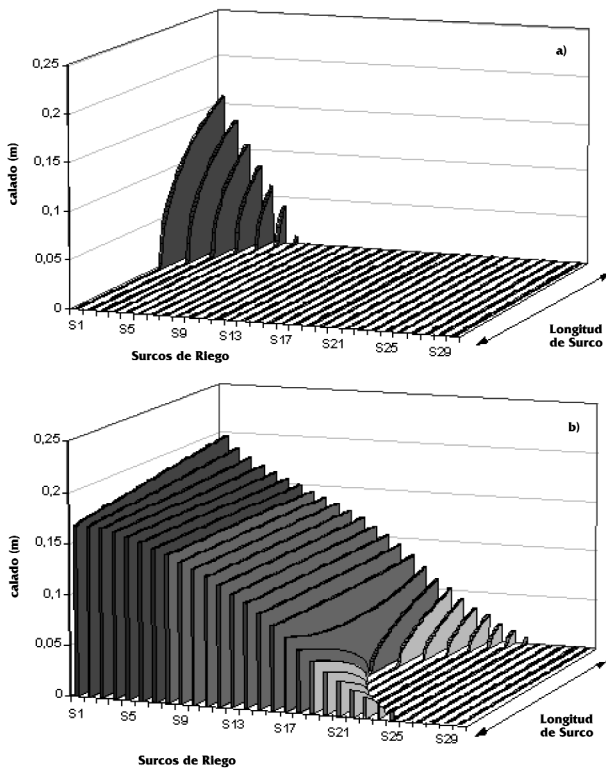


Figura 6. Evolución del calado para $t = 1$ min (a) y para $t = 45$ min (b).

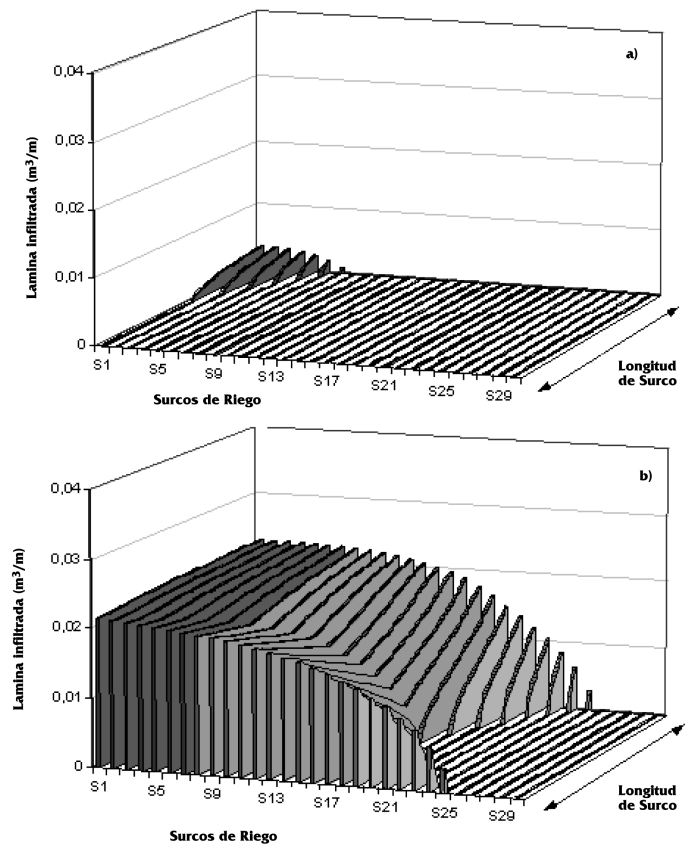


Figura 7. Evolución de la lámina infiltrada para $t = 1$ min (a) y para $t = 45$ min (b).

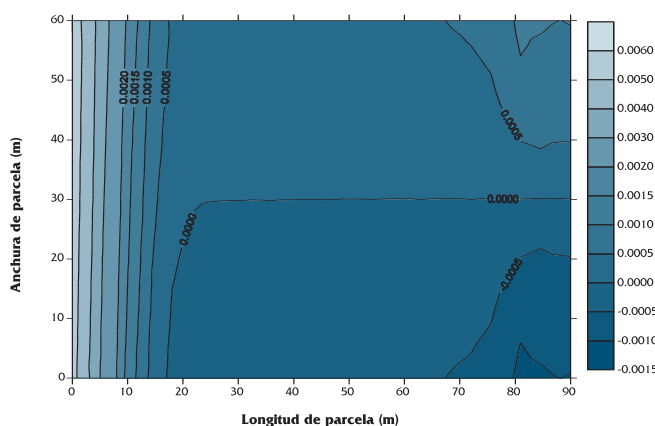


Figura 8. Distribución espacial del caudal (m^3s^{-1}) en el momento del corte de agua de riego para el modelo de surcos inundados.

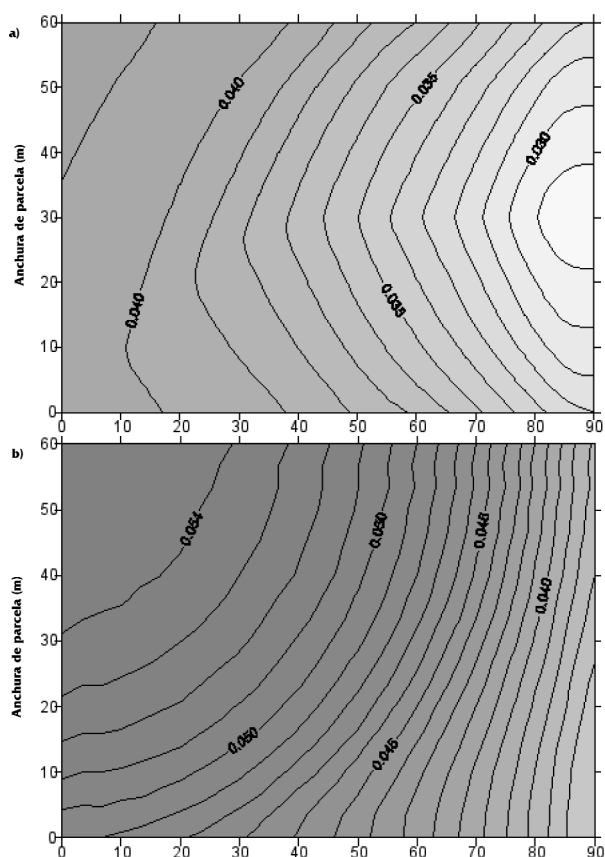


Figura 9. Distribución espacial de la lámina infiltrada (m) en riego por surcos inundados (a) y en riego por inundación (b).

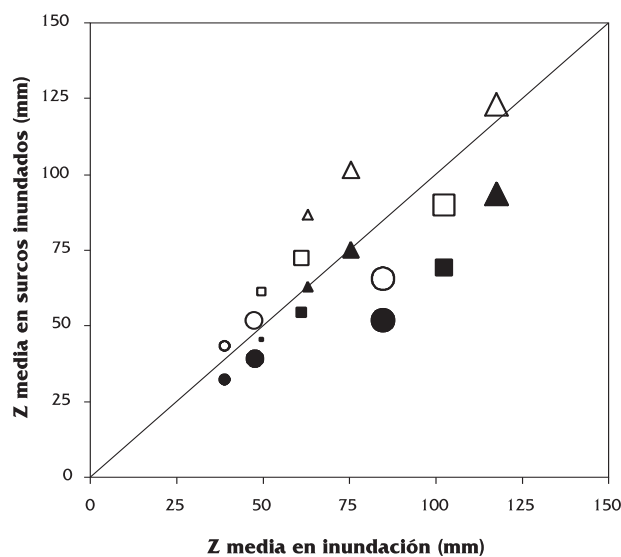


Figura 10. Comparación de las láminas infiltradas medias simuladas para el riego por inundación y el riego por surcos inundados para distintos valores de la anchura de la base de los surcos de distribución, el coeficiente de Manning y la familia de infiltración. Los símbolos vacíos se corresponden con $b = 0,26$ m; los símbolos llenos con $b = 0,52$ m. El valor de la n de Manning se corresponde con la forma del símbolo: ● para 0.04; ■ para 0.08 y ▲ para 0.15. El tamaño del símbolo es proporcional a la familia de infiltración.

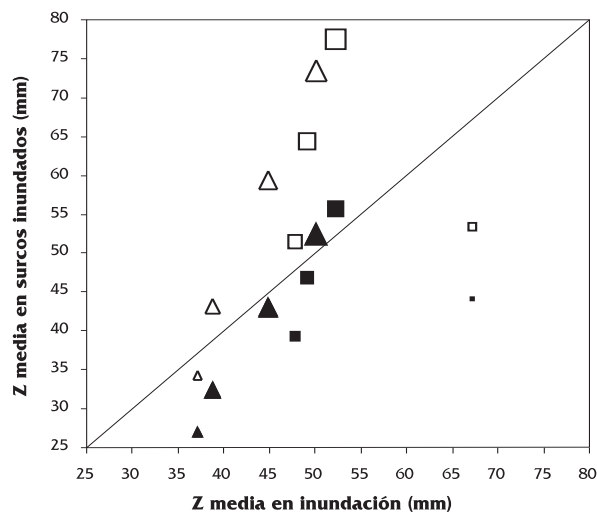


Figura 11. Comparación de las láminas infiltradas medias simuladas para el riego por inundación y el riego por surcos inundados para distintos valores de la anchura de la base de los surcos de distribución, el caudal unitario y la familia de infiltración. Los símbolos vacíos se corresponden con $b = 0,26$ m; los símbolos llenos con $b = 0,52$ m. El tamaño del símbolo es proporcional al valor del caudal unitario. La familia de infiltración se corresponde con la forma del símbolo: ▲ para 0.2 y ■ para 0.5.