

# UTILIZACION DE UN MODELO HIDRODINAMICO BIDIMENSIONAL PARA LA EVALUACION EXPERIMENTAL DEL RIEGO POR INUNDACION

E. PLAYAN

J. M.<sup>a</sup> FACI

Unidad de Suelos y Riegos (SIA)  
Laboratorio de Agronomía y Medio Ambiente (DGA-CSIC)  
Apdo. 727, 50080 Zaragoza

## RESUMEN

Los resultados de dos evaluaciones de riego realizadas en dos parcelas de distintas características físicas situadas una en Zaragoza (España), y la otra en Delta (Utah, EE.UU.) se comparan con las simulaciones producidas por los modelos SIRMOD y B2D. El modelo SIRMOD es un modelo unidimensional de riego por superficie, mientras que B2D es un modelo bidimensional de riego por inundación que se pretende validar.

En la evaluación realizada en Zaragoza, en la que el flujo de agua fue mayoritariamente unidimensional, B2D mostró una capacidad predictiva similar a la de SIRMOD, mientras que en la evaluación realizada en Delta, en la que el flujo tuvo un patrón marcadamente radial, B2D produjo estimaciones mucho más precisas del proceso de avance.

La capacidad predictiva del modelo B2D queda así probada, y el modelo se perfila como una herramienta en la simulación del riego por inundación, aportando un análisis bidimensional del flujo de agua superficial y subsuperficial que le permitirá simular el riego de parcelas de forma irregular y con varios puntos de entrada de agua.

**PALABRAS CLAVE:** Riego por inundación  
Bidimensional  
Modelos  
Avance  
Receso  
Infiltración

## INTRODUCCION

Las técnicas de diseño de sistemas de riego por superficie se han visto revolucionadas en las últimas décadas por la introducción de modelos matemáticos que simulan en ordenadores digitales los complicados procesos que gobiernan el movimiento del agua superficial y la infiltración del agua en el suelo. Clemmens (1979) identificó los modelos matemáticos como una importante herramienta para conseguir diseños de alta eficiencia en el uso del agua y de la energía, objetivo que fue señalado por Schmitz, Seus (1989) como una de las prioridades de la práctica del riego en nuestros días. El riego por inundación es uno de los sistemas

---

Recibido: 22-4-93

Aceptado para su publicación: 15-9-93

Redactor asociado: J. R. Castel

de riego por superficie más extendidos. Clemmens *et al.*, (1981) señalaron un incremento en la popularidad de los riegos por inundación debido a su alta uniformidad potencial, ausencia de escorrentía y bajas necesidades de energía y mano de obra.

Los modelos usuales de riego por superficie usan un análisis unidimensional, según el cual se supone que el flujo superficial y subsuperficial de agua no experimenta variación a lo ancho de la parcela, de manera que el frente de avance es una línea recta que se desplaza uniformemente a lo largo del campo. Esta hipótesis ha producido buenos resultados en casos como el riego por surcos o riego por escurrimiento e inundación en canchales estrechos, pero en términos generales constituye una simplificación que resta precisión al análisis.

La *Irrigation Software Division de Utah State University* (1989) produjo el modelo unidimensional SIRMOD, que simula un gran número de situaciones asociadas con riego por superficie. En la actualidad este modelo es ampliamente utilizado por los técnicos para diseñar sistemas de riego.

Recientemente, Playán (1992) desarrolló el modelo B2D. Se trata de un modelo bidimensional de riego por inundación que permite la simulación en parcelas de forma irregular y la utilización de un número variable de bocas de entrada en cada parcela. Debido a sus características el modelo B2D se puede aplicar a un amplio abanico de situaciones que no serían descritas de forma adecuada con otros modelos unidimensionales. Playán *et al.*, (1992) describieron el uso y las principales características del modelo en su manual del usuario.

El objetivo de este trabajo es validar con datos de campo obtenidos en la evaluación de dos riegos por inundación el modelo B2D y comparar sus resultados con los producidos por SIRMOD, un modelo ampliamente contrastado y depurado.

## MATERIAL Y METODOS

Los modelos unidimensionales del riego por superficie se basan en la resolución de las ecuaciones de Saint Venant para las condiciones de contorno que caracterizan a cada parcela y a la práctica del riego. Según Walker, Skogerboe (1987), las citadas ecuaciones pueden escribirse de la siguiente forma:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + i = 0 \quad [1]$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} - (S_0 - S_f) - \frac{vi}{2gh} = 0 \quad [2]$$

donde  $v$  es la velocidad del fluido (m/s);  $A$  es el área de una sección del fluido ( $m^2$ );  $Q$  es el caudal que atraviesa la sección  $A$  ( $m^3/s$ );  $h$  es el calado (m);  $t$  es la variable independiente tiempo (s);  $x$  es la variable independiente espacio (m);  $i$  es la velocidad de infiltración (m/s);  $g$  es la aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ );  $S_0$  es la pendiente del campo (m/m); y  $S_f$  es la pendiente de fricción interna, calculada con la ecuación de Manning.

El modelo utilizado para caracterizar la infiltración fue el de Kostiakov-Lewis (Walker, Skogerboe, 1987), que responde a la formula:

$$Z = k\tau^a + f_0\tau \quad [3]$$

donde  $Z$  es la altura de agua infiltrada (m);  $\tau$  es el tiempo de contacto (min);  $k$  es un coeficiente empírico ( $m/min^a$ );  $a$  es un exponente empírico; y  $f_0$  es un coeficiente empírico ( $m/min$ ). La velocidad de infiltración es la derivada temporal de  $Z$ , y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$i = \frac{\partial Z}{\partial t} = ka\tau^{a-1} + f_0 \quad [4]$$

La ecuación [1] es la ecuación de continuidad, mientras que la ecuación [2] es la ecuación dinámica. El modelo SIRMOD resuelve las ecuaciones hidrodinámicas unidimensionales del riego por superficie mediante el método del volumen de control deformable.

En modelos bidimensionales, la introducción de una nueva variable independiente, la variable espacial  $y$  (m), establece cambios en la ecuación de continuidad (ecuación [1]), y desdobra la ecuación [2] en dos ecuaciones de movimiento, una para el eje  $x$  y la otra para el eje  $y$ . Las siguientes ecuaciones [5], [6] y [7] propuestas por Akanbi, Katopodes (1988), componen el sistema que gobierna el flujo superficial de agua en dos dimensiones espaciales.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uh) + \frac{\partial}{\partial y}(vh) + i = 0 \quad [5]$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(uh) + \frac{\partial}{\partial x}(u^2h) + \frac{\partial}{\partial y}(uvh) + g \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{h^2}{2} \right) - \\ - gh(S_{0x} - S_{fx}) - \frac{ui}{2} = 0 \end{aligned} \quad [6]$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(vh) + \frac{\partial}{\partial y}(v^2h) + \frac{\partial}{\partial x}(uvh) + g \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{h^2}{2} \right) - \\ - gh(S_{0y} - S_{fy}) - \frac{vi}{2} = 0 \end{aligned} \quad [7]$$

donde  $u$  y  $v$  son las componentes de la velocidad del fluido en las direcciones  $x$  e  $y$  respectivamente ( $m/s$ );  $S_{fx}$  y  $S_{fy}$  son las pendientes de fricción interna; y  $S_{0x}$  y  $S_{0y}$  son las pendientes del suelo (ambas nulas en el caso que nos ocupa).

B2D utiliza un esquema «Leapfrog» en diferencias finitas para resolver estas ecuaciones (Cunge *et al.*, 1980). El método es explícito en la dimensión temporal, por lo que consigue una velocidad de ejecución que es compatible con su aplicación en ordenadores personales.

Los parámetros utilizados en este trabajo para expresar la idoneidad del riego fueron la uniformidad de distribución (DU), la eficiencia de aplicación ( $E_a$ ) y el porcentaje de percolación profunda (DPR).

La uniformidad de distribución utilizada aquí es la propuesta por Merriam, Keller (1978) como sigue:

$$DU = \frac{\dot{Z}_{25}}{\dot{Z}} 100 \quad [8]$$

donde  $\dot{Z}_{25}$  es el promedio de altura de agua infiltrada en el 25 p. 100 del área menos regada y  $\dot{Z}$  es el promedio de agua infiltrada en la parcela.

Se define  $Z_r$  como la capacidad de almacenaje de agua en la zona radicular del suelo inmediatamente antes del riego. El término dosis neta de riego también ha sido utilizado en ocasiones para referirse a  $Z_r$ . Puesto que en ninguna de las dos parcelas experimentales se determinó el déficit de humedad en el momento anterior al riego, se asumió un valor de  $Z_r$  de 0,100 m, el cual corresponde a un suelo franco con un porcentaje volumétrico de agua útil del 15 p. 100, una profundidad radicular de 1,25 m, y un nivel de agotamiento del agua útil entre riegos del 55 p. 100, lo que es aproximadamente adecuado para ambas parcelas.

La eficiencia de aplicación representa el porcentaje del agua aplicada que queda almacenada en la zona radicular del cultivo. En el caso de que el riego aplique en todos los puntos de la parcela una altura de agua infiltrada mayor o igual a  $Z_r$  (como es el caso de las dos evaluaciones presentadas en este trabajo), la eficiencia de aplicación se calcula usando la expresión:

$$E_a = \frac{Z_r}{\dot{Z}} 100 \quad [9]$$

El porcentaje de percolación profunda se calcula mediante la expresión:

$$DPR = 100 - E_a \quad [10]$$

Los modelos SIRMOD y B2D se utilizaron para comparar los resultados de dos evaluaciones de riego realizadas en la finca del SIA en Montañana, provincia de Zaragoza (ensayo Zaragoza), y en Delta, estado de Utah, EE.UU. (ensayo Utah).

**Ensayo Zaragoza.** Este ensayo se llevó a cabo en una parcela de 465 m de largo por 100 m de ancho (4,65 ha) regada desde una de sus esquinas. La parcela estaba recién labrada, y el coeficiente de aspereza de Manning se estimó en 0,10 siguiendo datos tabulados por Cuenca (1989). Un levantamiento topográfico de la parcela reveló que no había pendiente significativa, y que el 90 p. 100 de los puntos observados diferían del nivel medio menos de 5 cm.

Se realizaron tres ensayos de infiltración utilizando anillos simples instalados en tres puntos de la parcela. Los ensayos se realizaron al mismo tiempo que la evaluación de riego, añadiendo agua a los anillos en el momento en que el frente de agua llegaba a los mismos. De este modo la infiltración del agua de riego en el exterior del anillo impide que los datos sean afectados por un flujo horizontal de agua hacia el exterior del cilindro.

Con los datos experimentales de los cilindros se llevó a cabo una regresión para obtener estimaciones de los parámetros de la ecuación de Kostiakov (ecuación [3]). Para mejorar la representatividad de los parámetros se utilizó el método de la infiltración ajustada (Merriam, Keller, 1978; Walker, Skogerboe, 1987). Este método consiste en modificar el parámetro  $k$  para hacer que la curva de infiltración pase por el punto que tiene por coordenadas el tiempo de contacto medio y el promedio de agua infiltrada en la parcela ( $Z$ ). En definitiva, se trata de considerar toda la parcela como un cilindro infiltrómetro, con lo que se consigue mejorar el comportamiento de la ecuación de regresión para tiempos de contacto elevados, lo que produce una predicción más ajustada del receso por los modelos.

El caudal de riego se midió con un vertedero en pared gruesa (Replogle, 1975) calibrado localmente. Se realizaron varias medidas a lo largo del riego y se tomó la media como valor representativo.

Para facilitar la observación del avance y el receso se establecieron estacas cada 25 m a lo largo de los 465 m de la parcela. El avance se determinó anotando el tiempo en el que el frente de agua alcanzaba cada estación. En cuanto al receso, se tomó el tiempo en el que la sección de 100 m correspondiente a cada estación quedaba mayoritariamente al descubierto, después de infiltrar toda el agua.

**Ensayo Utah.** Se realizó sobre una parcela de 216 m de largo por 183 m de ancho (3,96 ha), recién labrada y sembrada de cebada, regada por una de sus esquinas. El coeficiente de aspereza de Manning se estimó igualmente en 0,10, y la parcela estaba recién nivelada por láser a pendiente cero.

La determinación del avance fue distinta de la utilizada en el ensayo Zaragoza, ya que la forma de la parcela hace que el frente de avance tenga una forma irregular que es preciso medir. Por ello, se marcaron en campo puntos sobre el contorno del frente de avance a tiempos determinados y se realizó posteriormente un levantamiento topográfico de dichos puntos para calcular sus coordenadas. Finalmente, se calculó el área de la parcela que estaba cubierta por el agua en cada momento.

Debido a la precisión de la nivelación por rayo láser, el receso fue esencialmente simultáneo en todos los puntos observados, por lo que sólo se pudo estimar un tiempo de receso para toda la parcela.

La infiltración se caracterizó con tres cilindros infiltrómetros instalados en tres puntos distintos de la parcela, y se siguió la misma metodología recogida en la descripción del ensayo Zaragoza, aunque en este caso el ensayo se realizó el día anterior al riego, y el flujo horizontal de agua en el suelo se evitó construyendo un pequeño dique alrededor de cada infiltrómetro y manteniéndolo lleno de agua mientras duró el ensayo. También en este caso se utilizó el método de la infiltración ajustada.

Al igual que en el ensayo anterior, el caudal se midió con un vertedero en pared gruesa.

## RESULTADOS

**Ensayo Zaragoza.** Las características de este ensayo hacen que, al ser la parcela mucho más larga que ancha, el flujo sea predominantemente unidimensional.

La Tabla 1 presenta los tiempos de avance y receso observados en cada una de las 20 estaciones distribuidas a lo largo de la parcela. La diferencia entre ambos tiempos en cada estación es el tiempo de contacto, que se empleó para calcular la lámina de agua infiltrada. El tiempo de avance hasta el final de la parcela fue de

TABLA 1

**TIEMPOS DE AVANCE, RECESO Y CONTACTO Y LAMINA DE AGUA INFILTRADA PARA LAS DISTINTAS ESTACIONES EN LA EVALUACION DEL ENSAYO ZARAGOZA**

*Advance, recession and oportunity times, and infiltrated depth for the different measurement points in the evaluation of the Zaragoza irrigation event*

Estación	Distancia (m)	Tiempo Avance (min)	Tiempo Receso (min)	Tiempo Contacto (min)	Lamina Infiltrada (m)
0	0	0	1.650	1.650	0,161
1	25	14	1.650	1.636	0,160
2	50	37	1.650	1.613	0,159
3	75	63	1.650	1.587	0,158
4	100	93	1.710	1.617	0,160
5	125	130	1.770	1.640	0,161
6	150	155	1.815	1.660	0,161
7	175	183	1.880	1.697	0,163
8	200	210	1.960	1.750	0,165
9	225	240	1.960	1.720	0,164
10	250	275	1.930	1.655	0,161
11	275	312	1.930	1.618	0,160
12	300	352	1.860	1.508	0,155
13	325	400	1.860	1.460	0,153
14	350	448	1.860	1.412	0,151
15	375	490	1.860	1.370	0,149
16	400	533	1.815	1.282	0,145
17	425	585	1.815	1.230	0,143
18	450	640	1.815	1.175	0,140
19	465	670	1.815	1.145	0,139
Media			1.813	1.521	0,156
CV (%)				12,1	5,1

670 min. El tiempo de receso promedio de los puntos observados fue de 1.813 min, con una fluctuación entre 1.650 y 1.960 min. El tiempo de contacto promedio fue de 1.521 min, con una fluctuación entre 1.145 y 1.750 min y un coeficiente de variación del 12,1 p. 100 (Fig. 1).

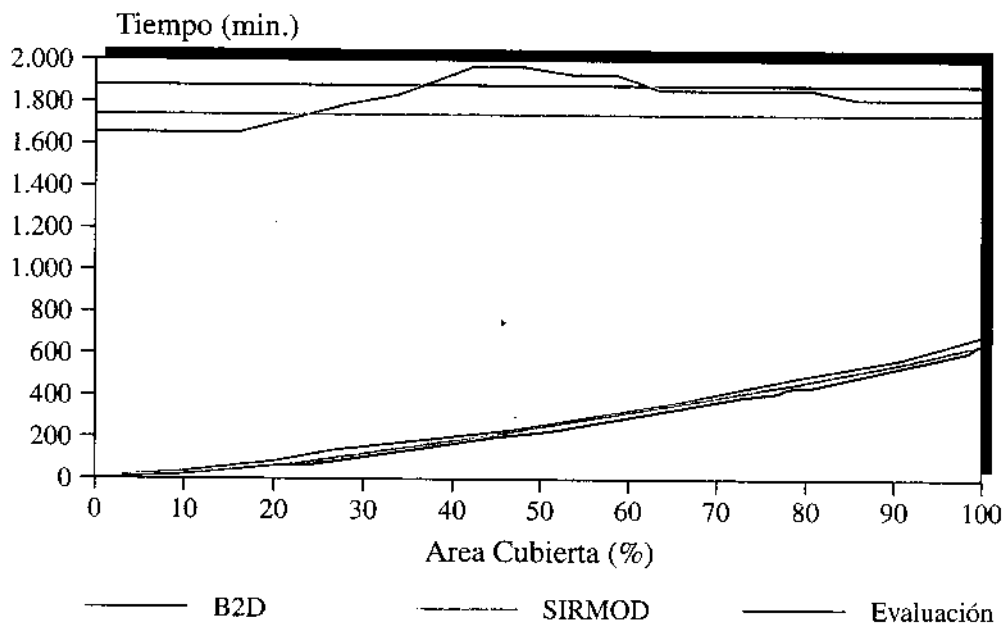
El caudal de riego, medido a lo largo de la evaluación, se estableció en 0,183 m<sup>3</sup>/s, mientras que la duración fue de 660 min, lo que arroja un volumen total aplicado de 7.240 m<sup>3</sup>, con una dosis media aplicada (Z) de 0,156 m (1.560 m<sup>3</sup>/ha).

La regresión de los datos de la infiltración según el modelo de Kostiakov-Lewis asignó al parámetro  $f_0$  un valor muy cercano a cero y negativo, lo que va en contra del significado físico que se le atribuye como velocidad de infiltración estabilizada del suelo. Por este motivo, se despreció su valor y se realizó una nueva regresión, esta vez con la ecuación de Kostiakov clásica ( $f_0 = 0$ ). Los resultados fueron los siguientes:

$$k = 0,00893 \text{ m/min}^a$$

$$a = 0,406 \quad (R^2 = 98,1)$$

Las coordenadas del punto utilizado para ajustar la infiltración son el tiempo de contacto medio (1.521 min) y la profundidad media de aplicación (0,156 m).



**Fig. 1.—Diagrama de avance y receso para el ensayo Zaragoza**  
**Datos procedentes de la evaluación y simulaciones por el modelo unidimensional SIRMÓD**  
**y el modelo bidimensional B2D**

*Advance-recession diagram for the Zaragoza irrigation event*  
*Data from the irrigation evaluation and simulations by the one-dimensional model SIRMÓD*  
*and the two-dimensional model B2D*

Una vez ajustado el coeficiente  $k$ , los nuevos valores de los parámetros de Kostia-  
 kov se establecieron en:

$$k = 0,00798 \text{ m/min}^a$$

$$a = 0,406$$

Estos parámetros se utilizaron para calcular la altura de agua infiltrada en cada punto de la parcela, tal como se recoge en la Tabla 1. La altura infiltrada varió entre 0,139 m y 0,161 m, con un coeficiente de variación del 5,1 p. 100, lo que supone menos de la mitad de la variación encontrada en los tiempos de contacto. La ecuación de infiltración hace que las amplias diferencias encontradas en los tiempos de contacto se amortigüen en las alturas infiltradas, lo que actúa en beneficio de la uniformidad y eficiencia del riego.

La Tabla 2 presenta los datos más significativos resultantes de la evaluación del riego y de las simulaciones realizadas con SIRMÓD y B2D, mientras que la Figura 1 muestra el diagrama de avance y receso de la evaluación y de las dos simulaciones.

Los dos modelos simularon el proceso de avance con una gran precisión, y los errores en la estimación del tiempo de avance fueron del 3,9 p. 100 para SIRMÓD y del 5,2 p. 100 para B2D, errores que se consideran muy satisfactorios, ya que están dentro del rango de precisión con el que se pueden medir en campo algunas variables críticas para la simulación, como el caudal de riego. De la Figura 1 se desprende que el receso no se produjo uniformemente en todo el campo debido a las diferencias de nivel existentes dentro de la parcela. Las depresiones embalsan agua en la última fase del riego y aumentan localmente el tiempo de receso. Tanto SIRMÓD

TABLA 2

**COMPARACION DE LOS RESULTADOS DE LA EVALUACION Y SIMULACION CON EL MODELO UNIDIMENSIONAL SIRMOD Y EL MODELO BIDIMENSIONAL B2D DEL ENSAYO ZARAGOZA**

*Comparisons of results of the evaluation and the simulations with the one-dimensional model SIRMOD and the two-dimensional model B2D for the Zaragoza irrigation event*

Parámetro	Evaluación	SIRMOD	B2D
Tiempo de avance (min)	670	644	635
Tiempo de receso (min)	1.815	1.736	1.874
Z máximo (m)	0,161	0,164	0,170
Z mínimo (m)	0,139	0,131	0,144
E <sub>a</sub> (%)	64,1	63,4	62,7
DU (%)	92,8	92,5	93,0

como B2D simulan el proceso de receso como una línea recta porque consideran el terreno perfectamente nivelado a pendiente cero. Ambos modelos proporcionaron una estimación muy razonable del tiempo de receso promedio observado en campo, con errores del 4,2 p. 100 para SIRMOD y del 3,4 p. 100 para B2D.

Los resultados de la evaluación indican que el riego tuvo una elevada uniformidad de distribución (DU = 92,8 p. 100) y una aceptable eficiencia de aplicación (E<sub>a</sub> = 64,1 p. 100). Los errores cometidos por los modelos en la estimación de la eficiencia de aplicación fueron del 1,1 p. 100 para SIRMOD y del 2,2 p. 100 para B2D, mientras que en la uniformidad de distribución los errores fueron del 0,3 p. 100 y 0,2 p. 100 para SIRMOD y B2D, respectivamente.

El bajo caudal utilizado en relación con el tamaño de la parcela produjo un lento avance del agua que indujo fuertes diferencias en los tiempos de contacto. La moderadamente baja velocidad de infiltración amortiguó buena parte de estas diferencias, lo que resultó en un riego uniforme. Para cubrir la totalidad de la parcela fue necesario sin embargo un elevado volumen de agua, lo que produjo una dosis media de aplicación superior a la capacidad de almacenaje del suelo, por lo que buena parte de ésta fue percolación profunda.

El calado tuvo un valor máximo de 0,094 m según la estimación de SIRMOD, mientras que según B2D su valor alcanzó 0,097 m. Este dato no se midió durante la evaluación, aunque resulta significativa la similitud en las estimaciones producidas por los dos modelos.

**Ensayo Utah.** La forma de la parcela (aproximadamente cuadrada), y el hecho de que ésta se riega desde una esquina hacen que el flujo tenga un patrón radial, por lo que el modelo bidimensional resulta más adecuado para predecir el fenómeno del riego. Para utilizar el modelo SIRMOD es preciso suponer que el agua de riego se vierte uniformemente desde uno de los lados de la parcela.

La Tabla 3 recoge los principales datos de la evaluación del riego. La primera columna de la Tabla es el tiempo de avance, que se corresponde con los tiempos en que se realizaron las medidas de la situación del frente del agua. Estas observaciones se realizaron a intervalos de una hora (salvo la primera hora, de la que no se dispone de esa medida).

TABLA 3

**TIEMPO DE AVANCE, AREA CUBIERTA, TIEMPOS DE RECESO Y CONTACTO Y LAMINA DE AGUA INFILTRADA PARA LOS DISTINTOS CONTROLES EN LA EVALUACION DEL ENSAYO UTAH**

*Advance time, water covered area, recession and oportunity times, and infiltrated depth at different observation times in the evaluation of the Utah irrigation event*

Tiempo Avance (min)	Area Cubierta (%)	Tiempo Receso (min)	Tiempo Contacto (min)	Lámina Infiltrada (m)
0	0,00	1.020	1.020	0,263
120	34,34	1.020	900	0,250
180	49,19	1.020	839	0,243
240	61,69	1.020	779	0,236
300	72,63	1.020	720	0,229
360	81,49	1.020	660	0,221
420	88,72	1.020	600	0,213
480	95,39	1.020	540	0,204
570	100,00	1.020	450	0,190
Media		1.020	809	0,221
CV (%)			23,6	9,6

El tiempo de avance hasta el final de la parcela fue de 570 min, y el tiempo de receso fue de 1.020 min en todos los puntos. El tiempo de contacto fluctuó entre 450 y 1.020 min, con una media ponderada por área de 809 min (Fig. 2). El coeficiente de variación en el tiempo de contacto fue del 23,6 p. 100.

El caudal de riego fue de 0,270 m<sup>3</sup>/s, con un tiempo de aplicación de 540 min. El volumen total aplicado de 8.750 m<sup>3</sup>/s, produjo una lámina de agua infiltrada media de 0,221 m (2.210 m<sup>3</sup>/ha).

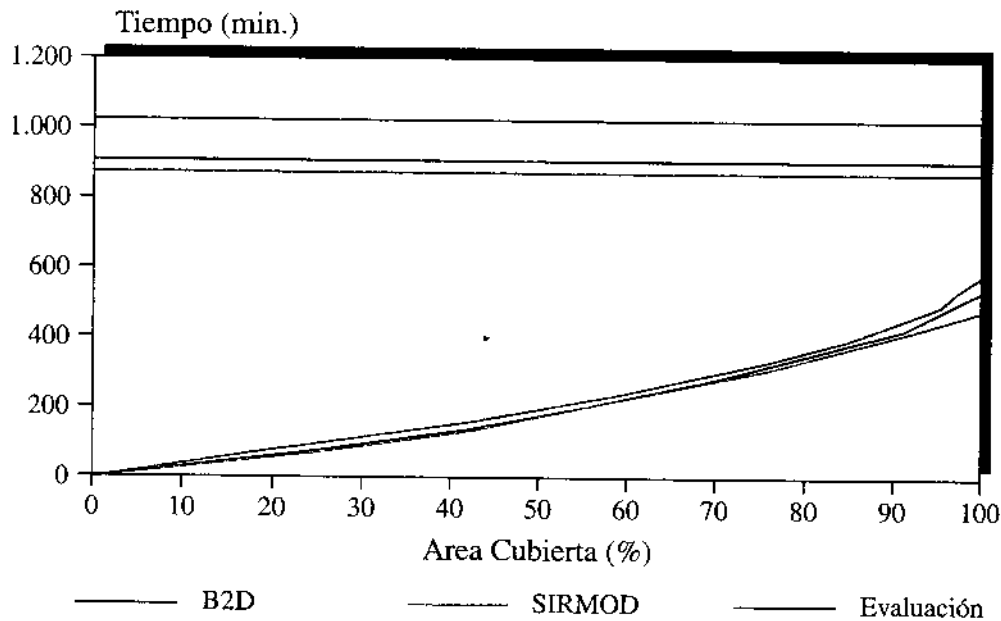
Al igual que en el ensayo Zaragoza, la regresión de los datos de infiltración con el modelo de Kostiakov-Lewis produjo un valor negativo y muy cercano a cero para el parámetro  $f_0$ , por lo que se utilizó el modelo de Kostiakov clásico. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

$$\begin{aligned} k &= 0,0378 \text{ m/min}^a \\ a &= 0,397 \end{aligned} \quad (R^2 = 93,3)$$

El ajuste de la ecuación de infiltración se llevó a cabo con el punto que tiene por coordenadas el tiempo de contacto medio ponderado por el área (809 min), y la lámina media infiltrada (0,221 m). Los nuevos coeficientes de la función de infiltración fueron:

$$\begin{aligned} k &= 0,0168 \text{ m/min}^a \\ a &= 0,397 \end{aligned}$$

La Tabla 3 recoge los valores de la lámina de agua infiltrada correspondiente a cada tiempo de avance. La infiltración fluctuó entre 0,190 y 0,263 m, con un coeficiente de variación del 9,6 p. 100, nuevamente muy inferior al de los tiempos de contacto.



**Fig. 2.—Diagrama de avance y receso para el ensayo Utah**  
**Datos procedentes de la evaluación y simulaciones por el modelo unidimensional SIRMÓD**  
**y el modelo bidimensional B2D**

*Advance-recession diagram for the Utah irrigation event*  
*Data from the irrigation evaluation and simulations by the one-dimensional model SIRMÓD*  
*and the two-dimensional model B2D*

En la Tabla 4 se recogen los principales resultados de la evaluación y de las simulaciones, y la Figura 2 presenta las curvas de avance y receso obtenidas de la evaluación y de los dos modelos. SIRMÓD y B2D simulan con precisión el porcentaje de área cubierta durante la mayoría de la fase de avance, aunque al final de

**TABLA 4**

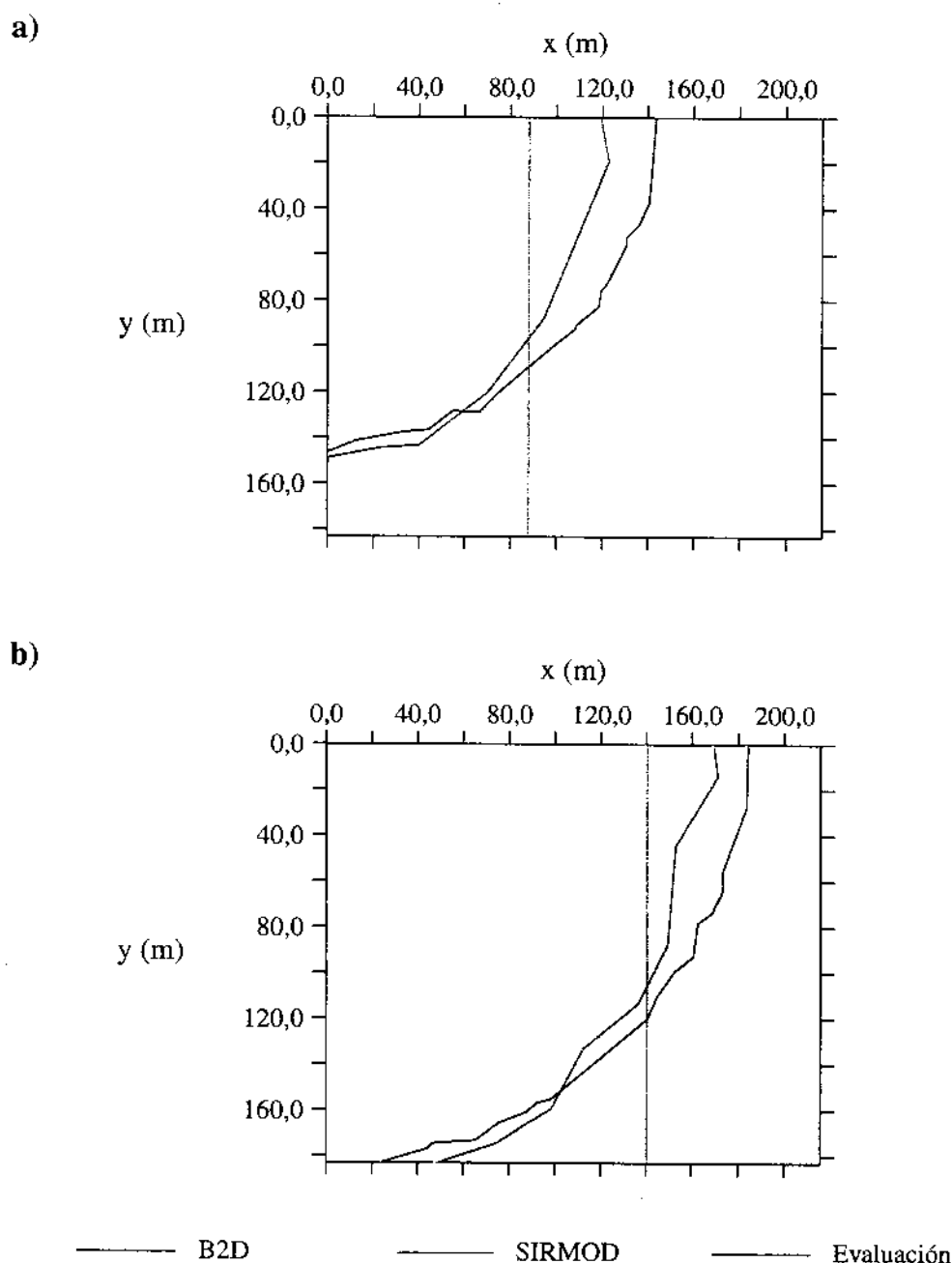
**COMPARACION DE LOS RESULTADOS DE LA EVALUACION**  
**Y SIMULACION CON EL MODELO UNIDIMENSIONAL B2D**  
**Y EL MODELO BIDIMENSIONAL SIRMÓD DEL ENSAYO UTAH**

*Comparisons of results of the evaluation and the simulations with the*  
*one-dimensional model SIRMÓD and the two-dimensional model B2D*  
*for the Zaragoza irrigation event*

Parámetro	Evaluación	SIRMÓD	B2D
Tiempo de avance (min)	570	458	525
Tiempo de receso (min)	1.020	868	900
Z máximo (m)	0,263	0,244	0,250
Z mínimo (m)	0,190	0,166	0,176
E <sub>a</sub> (%)	45,2	44,9	44,3
DU (%)	89,7	87,0	93,0

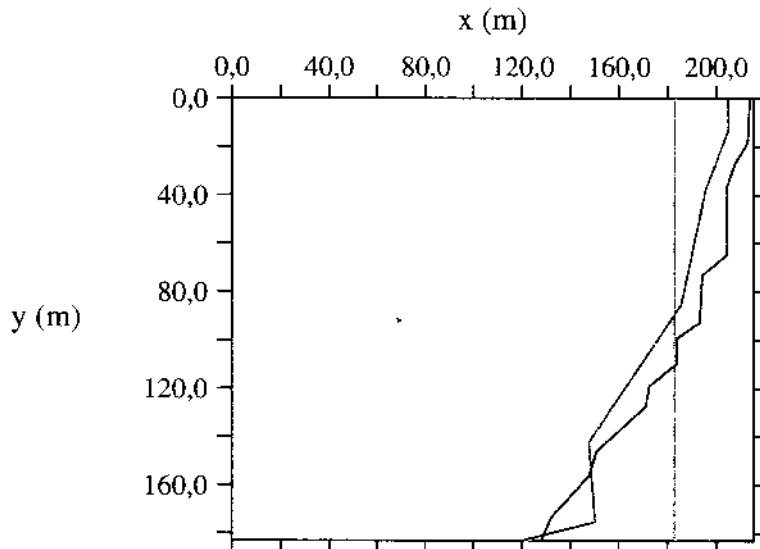
ésta el modelo SIRMOD incurre en una subestimación del tiempo de avance del 20 p. 100, frente a tan sólo un 8 p. 100 de B2D.

A pesar de que SIRMOD predice con cierta precisión la curva de avance, al ser un modelo unidimensional sólo puede estimar la forma del frente de avance como una línea recta. Las Figuras 3 y 4 presentan mapas del frente de avance a tiempos 2, 4, 6 y 8 h, para los resultados de la evaluación y las predicciones de los dos modelos. La entrada de agua a la parcela se localiza en la esquina superior izquierda. El modelo B2D produce estimaciones aceptables de la localización y

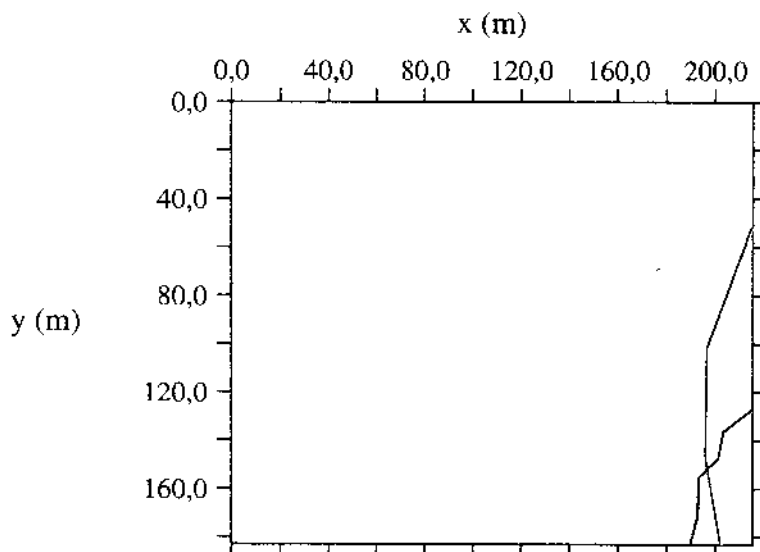


**Fig. 3.-Perfiles de avance para el experimento Utah a tiempos 2 h a) y 4 h b)**  
*Advance profiles for the Utah irrigation event at times 2 h a) and 4 h b)*

a)



b)



—— B2D                      - - - - SIRMÓD                      ..... Evaluación

**Fig. 4.—Perfiles de avance para el experimento Utah a tiempos 6 h a) y 8 h b)**  
*Advance profiles for the Utah irrigation event at times 6 h a) and 8 h b)*

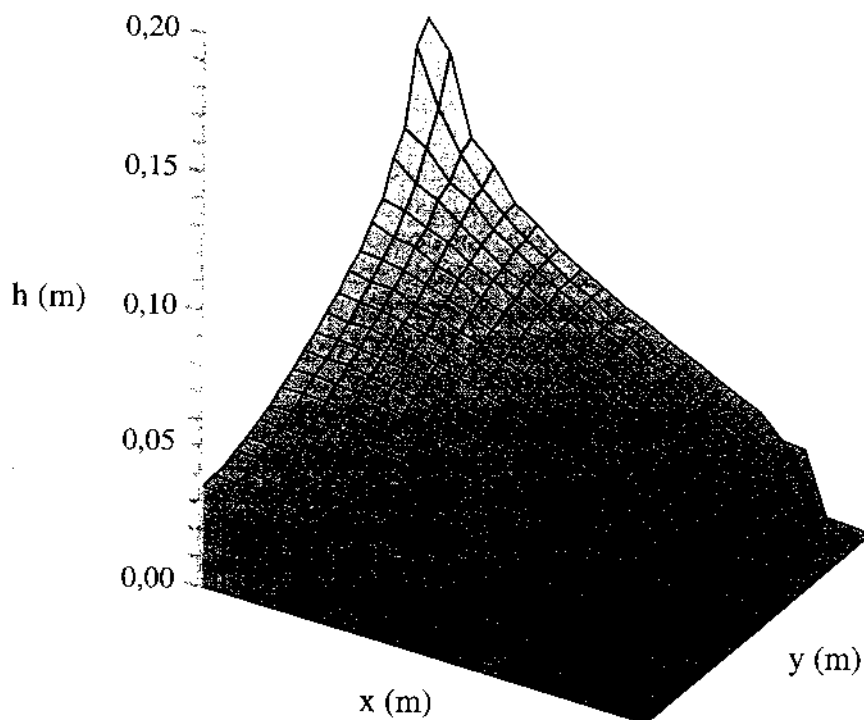
forma del frente de avance a lo largo de la simulación. A 2 y 4 horas del comienzo del riego la forma del frente de avance es similar a un sector de circunferencia, mientras que a 6 y 8 horas su forma es más lineal, debido al choque del frente de avance con las esquinas de la parcela.

Ambos modelos subestiman el tiempo de receso, con errores del 15 p. 100 para SIRMÓD y del 12 p. 100 para B2D, posiblemente debido a una deficiente estimación de la velocidad de infiltración para tiempos de contacto elevados.

En cuanto a los índices de calidad del riego, la evaluación indica que la uniformidad de distribución fue elevada ( $DU = 89,7$  p. 100), mientras que la eficiencia de aplicación fue baja, tan sólo del 45,2 p. 100. Esto es debido, al igual que en el ensayo Zaragoza, a una falta de adecuación entre el tamaño de la parcela, su velocidad de infiltración y el caudal de riego.

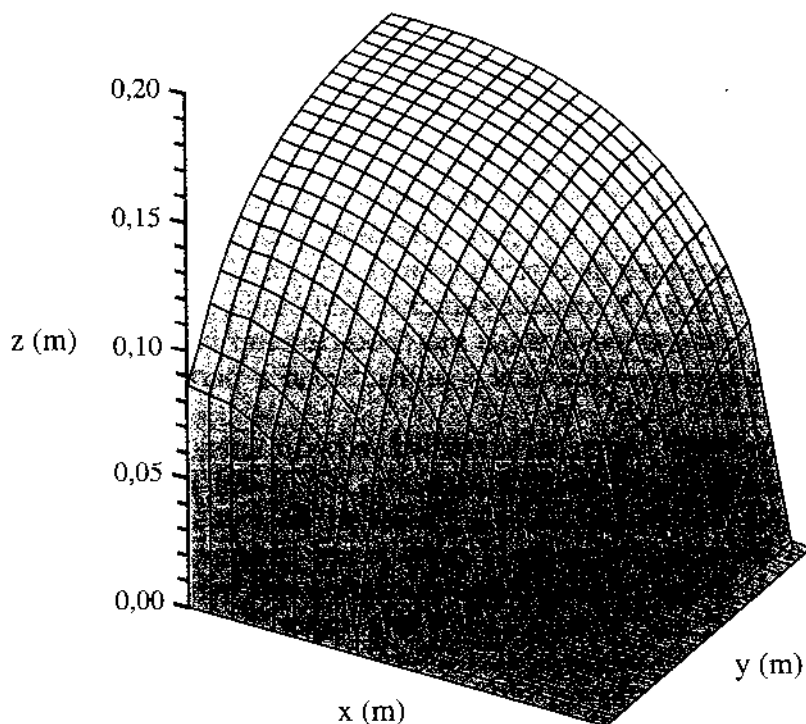
Los errores cometidos por los modelos en la estimación de la eficiencia de aplicación fueron del 0,7 p. 100 para SIRMOD y del 2,0 p. 100 para B2D, mientras que en la uniformidad de distribución los errores fueron del 3,0 p. 100 y 3,7 p. 100 para SIRMOD y B2D, respectivamente. Sin embargo, hay que hacer notar que las características de este ensayo (su marcado carácter bidimensional) dificultan la estimación precisa de su eficiencia y uniformidad a partir de los datos de la evaluación.

Las Figuras 5 y 6 son representaciones tridimensionales del calado y de la lámina de agua infiltrada, respectivamente, a 5 h del inicio del riego, según la simulación realizada por B2D. La finalidad de estas figuras es presentar de forma gráfica los resultados de la simulación bidimensional. A la vista de la Figura 5 cabe destacar la estabilidad numérica del método de cálculo utilizado en el modelo B2D, que se traduce en una superficie libre de oscilaciones que enmascaren la solución de las ecuaciones diferenciales [5], [6] y [7]. En cuanto a la Figura 6, su representación bidimensional de la altura de agua infiltrada en cada punto de la parcela tiene un gran interés agronómico, ya que supone un gran acercamiento a la realidad respecto de los resultados ofrecidos por los modelos unidimensionales.



**Fig. 5.—Representación tridimensional del calado en el ensayo Utah a 5 horas del comienzo del riego, según la simulación por B2D**

*Three-dimensional plot of surface water depth in the Utah irrigation event at time 5 h, as simulated by B2D*



**Fig. 6.—Representación tridimensional de la altura de agua infiltrada en el ensayo Utah a 5 horas del comienzo del riego, según la simulación por B2D**

*Three-dimensional plot of infiltrated water depth in the Utah irrigation event at time 5 h, as simulated by B2D*

En la Figura 5 se observa que el calado alcanza su valor máximo en el punto de entrada de agua. A lo largo de la simulación éste llega a ser de 0,142 m, mientras que en la simulación con SIRMOD el calado máximo toma un valor de 0,051 m, aproximadamente la tercera parte. Esta diferencia es debida a la mayor adecuación teórica del modelo bidimensional en el caso estudiado. B2D aplica todo el caudal de entrada en un punto de la parcela, tal como ocurre en la realidad, por lo que la velocidad y el calado deben de ser bastante más elevados que los calculados por SIRMOD, que reparte todo el caudal de entrada a lo largo de un frente de 183 m.

## RESUMEN Y CONCLUSIONES

Las dos evaluaciones de riego llevadas a cabo sobre parcelas recién labradas revelan que la uniformidad del riego fue elevada en ambos casos. En cuanto a la eficiencia, los resultados son aceptables en el ensayo Zaragoza y bajos en el ensayo Utah. No obstante, hay que recordar que la eficiencia de aplicación es muy sensible al valor de la capacidad de almacenaje de agua en la zona radicular del suelo inmediatamente antes del riego ( $Z_r$ ), a la que se ha dado un valor hipotético de 0,100 m.

El hecho de que se trate del primer riego de la temporada en ambos casos (primer riego desde una labor del suelo), hace que la infiltración del suelo sea mucho más elevada de lo esperable en riegos sucesivos. Este primer riego es típicamente mucho más ineficiente que los posteriores.

Los resultados de los ensayos sugieren que el modelo B2D es capaz de predecir las principales características de un riego por inundación. El modelo tiene una capacidad predictiva semejante a la de SIRMÓD en el ensayo Zaragoza y se ajusta mejor a los resultados de la evaluación en el ensayo Utah, en el que la estimación de SIRMÓD del tiempo de avance incurre en un error del 20 p. 100. Este problema, asociado a la utilización de SIRMÓD en parcelas cuadradas con predominio del flujo bidimensional, es particularmente grave en riego por inundación ya que el tiempo de avance es un parámetro de diseño, y está muy frecuentemente ligado al tiempo de riego.

Los dos ensayos analizados confirman los resultados de las simulaciones realizadas por Playán (1992) en el sentido de que en parcelas rectangulares regadas desde una esquina se justifica la utilización de un modelo bidimensional cuando el coeficiente de forma, definido como la relación de anchura a longitud de una parcela rectangular, es superior a 0,4. En el ensayo Zaragoza, este coeficiente fue de 0,2 y los resultados de los dos modelos son esencialmente similares, mientras que en el ensayo Utah el índice alcanza un valor de 0,8 y el modelo SIRMÓD no puede predecir la curva de avance con la necesaria precisión.

Las diferencias encontradas en el ensayo Utah en la predicción del calado máximo por parte de los dos modelos hacen que se plantee la necesidad de realizar ensayos de campo para detectar la fiabilidad de las estimaciones realizadas por B2D. Este dato tiene una aplicación inmediata en el diseño del dique que rodea a las parcelas de inundación.

Cabe destacar que el modelo propuesto tiene dos fuentes de empiricismo que limitan la generalidad de esta validación. El primero es la fórmula de infiltración de Kostiakov cuyos parámetros empíricos deben hallarse experimentalmente, y están ajustados con los resultados de la propia evaluación. El segundo es la fórmula de Manning, que puede no ser adecuada para flujos laminares y cuyo coeficiente de aspereza debe estimarse en función de datos tabulados.

Los modelos bidimensionales constituyen la única herramienta disponible para simular el riego por inundación en canteros de forma irregular, con varios puntos de entrada de agua, o con variabilidad espacial de la infiltración. Su aplicación al diseño y evaluación de estos sistemas de riego puede contribuir a la mejora de la eficiencia de aplicación y a racionalizar el uso de los recursos productivos.

## SIMBOLOS Y NOTACION

a	= Exponente empírico de la ecuación de Kostiakov.
A	= Área de la sección de fluido (m <sup>2</sup> ).
DU	= Uniformidad de distribución (%).
DPR	= Relación de percolación profunda (%).
E <sub>a</sub>	= Eficiencia de aplicación (%).
f <sub>0</sub>	= Coeficiente empírico de la ecuación de Kostiakov (m/min).
g	= Aceleración de la gravedad (m/s <sup>2</sup> ).
h	= Calado del fluido (m).
i	= Velocidad de infiltración (m/s).
k	= Coeficiente empírico de Kostiakov (m/min <sup>a</sup> ).
Q	= Caudal (m <sup>3</sup> /s).
S <sub>0</sub>	= Pendiente del terreno.
S <sub>0x</sub>	= 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 interna.  
 $S_{fx}$  = Pendiente de fricción interna en la dirección del eje x.  
 $S_{fy}$  = Pendiente de fricción interna en la dirección del eje y.  
 $t$  = Tiempo (s).  
 $u$  = Velocidad del fluido en la dirección del eje x (m/s).  
 $v$  = Velocidad del fluido en la dirección del eje y (m/s).  
 $x$  = Coordenada espacial (m).  
 $y$  = Coordenada espacial (m).  
 $Z$  = Lámina de agua infiltrada (m).  
 $\bar{Z}$  = Lámina de agua media infiltrada en la parcela (m).  
 $Z_{25}$  = Lámina de agua media infiltrada en el 25 p. 100 de los puntos que menos agua reciben (m).  
 $Z_r$  = Capacidad de almacenaje de agua en la zona radicular del suelo inmediatamente antes del riego (m).  
 $\partial$  = Derivada parcial.  
 $\tau$  = Tiempo de contacto (min).

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a La Caixa y a la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología por la concesión a Enrique Playán de dos becas de estudios en Utah State University, Logan, Utah, EE.UU., y a Miguel Izquierdo por la toma de datos del ensayo Zaragoza.

## SUMMARY

### A two-dimensional hydrodynamic model for basin irrigation evaluation

Results from basin irrigation evaluations performed in two different level basins located in Zaragoza (Spain) and in Delta (Utah, USA) are compared with simulations produced by the SIRMOD and B2D models. SIRMOD is a one-dimensional surface irrigation model, and B2D is a two-dimensional basin irrigation model in the process of being validated.

When used to simulate the Zaragoza irrigation event, where the flow is mostly one-dimensional, B2D showed a predictive capability similar to the one by SIRMOD. When applied to the Delta irrigation event, where the flow pattern is strongly radial, B2D produced a much better simulation of the advance process.

The predictive capability of the B2D model is therefore established, and the model emerges as an important tool in basin irrigation simulation. The two-dimensional analysis of surface and subsurface flow allows B2D to simulate irregularly shaped basins, with several inflow points, and with spatially varied infiltration.

**KEY WORDS:** Basin irrigation  
Two-dimensional  
Models  
Advance  
Recession

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AKANBI A. A., KATOPODES N. D., 1988. Model for flood propagation on initially dry land. *J. Hydr. Div.*, ASCE 114 (7): 689-706.  
 CLEMMENS A. J., 1979. Verification of the zero-inertia model for border irrigation. *Trans. ASAE* 22 (6): 1306-1309.

- CLEMMENS J., STRELKOFF T., DEDRICK A. R., 1981. Development of solutions for level-basin design. *J. Irrig. Drain. Div.*, ASCE 107 (3): 265-279.
- CUENCA R. H., 1989. *Irrigation system design: an engineering approach*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. 552 p.
- CUNGE J. A., HOLLY F. M., VERWEY A., 1980. *Practical aspects of computational river hydraulics*. Pitman Publishers, Boston. 420 p.
- IRRIGATION SOFTWARE ENGINEERING DIVISION, 1989. *SIRMOD, the surface irrigation simulation model. User's guide*, Department of Biological and Irrigation Engineering, Utah State University. Logan, Utah. 56 p.
- MERRIAM J. L., KELLER J., 1978. *Farm irrigation system evaluation: a guide for management*. 3.<sup>a</sup> edición, Utah State University, Logan, 285 p.
- PLAYAN E., 1992. *Two-dimensional hydrodynamic simulation of basin irrigation: analysis of field shape effects on irrigation performance*. Tesis doctoral. Utah State University, Logan. 159 p.
- PLAYAN E., MERKLEY G. P., WALKER W. R., 1992. *B2D, two-dimensional Basin Irrigation simulation model. User's guide*, Department of Biological and Irrigation Engineering, Utah State University. Logan, Utah. 56 p.
- REPLOGLE J. A., 1975. Critical-flow flumes with complex cross section. *Proc., Am. Soc. Civ. Eng. Irrig. and Drain. Spec. Conf.*, Logan, UT, 366-388.
- SCHMITHZ G. H., SEUS G. S., 1989. Analytical model of level basin irrigation. *J. Irrig. Drain Div.*, ASCE 115 (1): 78-95.
- WALKER W. R., SKOGERBOE G. V., 1987. *Surface Irrigation. Theory and practice*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. 386 p.