

SIMULACIÓN BIDIMENSIONAL DEL RIEGO POR NUNDACIÓN CON MICROTOPOGRAFÍA

Enrique Playán Jubillar

Unidad de Suelos y Riegos (SIA)

Laboratorio Asociado de Agronomía y Medio Ambiente (DGA-CSIC)

Apdo. 727. 50080 Zaragoza

RESUMEN: En este artículo se describe la implementación de modelos bidimensionales del riego por inundación considerando la microtopografía del terreno. Se discuten los fundamentos teóricos de los modelos bidimensionales del flujo en lámina libre, su utilidad en el riego por superficie y la aplicación del procedimiento numérico "leapfrog" a la resolución de las ecuaciones diferenciales que gobiernan este tipo de flujo. La inclusión de la microtopografía en la modelación del riego por inundación aumenta sustancialmente el número de datos necesarios, pero puede permitir caracterizar la relación entre microtopografía y rendimiento del riego. Esto resulta particularmente interesante en nuestros días ya que la técnica de explanación guiada por rayo láser permite a los agricultores un mayor control sobre el estado de explanación de sus canteros. Finalmente, se analiza un caso hipotético para ilustrar el funcionamiento del modelo en un cantero a nivel con microtopografía. Los resultados indican que una deficiente explanación distorsiona la configuración del frente de avance, retrasa la fase de avance, induce variabilidad en el tiempo de receso y reduce la uniformidad y rendimiento potencial del riego.

INTRODUCCIÓN

La aparente simplicidad con la que muchos sistemas de riego por superficie son manejados contrasta abiertamente con la complejidad de sus aspectos teóricos. La base hidráulica del riego por superficie es la teoría del flujo en lámina libre, que es a la vez el fundamento del flujo en canales. Los avances teóricos en flujo en lámina libre se han producido en las últimas décadas debido a las necesidades de estas dos especialidades de la ingeniería hidráulica.

Las ecuaciones que expresan las leyes de conservación que gobiernan este tipo de flujo son conocidas desde hace décadas. Sin embargo, su desarrollo ha estado limitado por el desconocimiento hasta la fecha de soluciones cerradas a este conjunto de ecuaciones diferenciales. Únicamente a partir de los años 70 se han desarrollado aplicaciones experimentales de resolución numérica que han permitido elaborar programas de ordenador que resuelven las ecuaciones para una gran variedad de condiciones de contorno.

El enfoque unidimensional ha sido ampliamente utilizado para la generación de modelos de riego por superficie. En este enfoque se considera una única coordenada espacial, la coordenada x . Los modelos así construidos se adaptan muy bien a algunos tipos de riego por superficie, como es el caso del riego por surcos, o el del riego en canteros rectangulares cuya anchura sea mucho menor que su longitud. En estos casos se puede asumir que el calado y la velocidad del flujo permanecen constantes a lo ancho del cantero o surco.

En muchas otras ocasiones la modelación unidimensional no resulta suficiente para analizar las características del riego por superficie. Algunos de estos casos particulares son:

1. Canteros de forma irregular.
2. Si en un mismo cantero hay varios puntos simultáneos o sucesivos de entrada de agua.

3. Cuando la forma del cantero es aproximadamente cuadrada y éste no se riega uniformemente desde uno de sus lados (condiciones que son frecuentes en el riego a manta).
4. Cuando resulta interesante poner de manifiesto la variabilidad espacial de algunas variables que tienen una gran incidencia en la uniformidad y el rendimiento del riego, como es el caso de la elevación del suelo o la infiltración.

En estos casos es preciso resolver las ecuaciones bidimensionales del flujo en lámina libre. Estas ecuaciones incorporan dos variables independientes espaciales, generalmente las coordenadas cartesianas x e y .

La utilización de los modelos bidimensionales en el riego por inundación fue introducida por Playán (1992) y Playán et al. (1994a, 1994b). Estos autores presentaron un modelo para ordenador capaz de simular riegos por inundación en canteros de forma irregular y de topografía perfectamente llana. El modelo, que se llamó B2D, permite definir varios tipos de tomas con la condición de que éstos estén situados en el margen del cantero.

En este artículo se discute la extensión de este modelo a la modelación de la microtopografía existente en canteros de riego por inundación. La influencia de la microtopografía sobre los tiempos característicos del riego y sobre los índices de idoneidad se pone de manifiesto con la discusión de un caso de estudio hipotético.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Los objetivos planteados a la hora de formular el modelo B2D coinciden con los expuestos por Katopodes y Strelkoff (1977). Estos autores concluyeron que los modelos debían (1) tener una sólida base teórica, estando libres de términos empíricos; (2) ser numéricamente consistentes, estables y precisos; (3) ser físicamente completos; (4) ser sencillos de programar y (5) ser fáciles de operar. La práctica ha demostrado que resulta difícil conseguir a la vez todos estos objetivos, ya que en ocasiones éstos entran en contradicción entre ellos. El hecho de haber alcanzado una consecución tan sólo parcial de alguno de ellos no debe dejar de satisfacer a quienes, quizá por deformación profesional, estén acostumbrados a las soluciones de compromiso.

En las siguientes páginas se aborda una breve descripción del modelo y de la extensión aquí presentada. Al mismo tiempo se hace una discusión sobre el grado de consecución de los objetivos marcados por Katopodes y Strelkoff.

Ecuaciones de flujo

Las ecuaciones que se introducen a continuación representan una generalización de las ecuaciones unidimensionales de Saint Venant, a la vez que son una forma particular de las ecuaciones generales de movimiento de fluidos de Navier-Stokes. Distintos autores han utilizado diferentes expresiones de estas ecuaciones, en función de sus necesidades específicas. Por proximidad en la aplicación, resulta conveniente introducirlas en este caso siguiendo la forma propuesta por Akanbi y Katopodes (1988):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uh) + \frac{\partial}{\partial y}(vh) + i = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(uh) + \frac{\partial}{\partial x}(u^2h) + \frac{\partial}{\partial y}(uvh) + g \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{h^2}{2}\right) - gh(S_{0x} - S_{fx}) - D_{1x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(vh) + \frac{\partial}{\partial y}(v^2h) + \frac{\partial}{\partial x}(uvh) + g \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{h^2}{2}\right) - gh(S_{0y} - S_{fy}) - D_{1y} = 0 \quad (3)$$

donde:

h es el calado del flujo (m)

t es el tiempo (s)

i es la velocidad de infiltración (m/s)

u y v son las velocidades del flujo en las direcciones x e y , respectivamente (m/s)

g es la constante gravitatoria (m/s^2)

S_{fx} y S_{fy} son las pendientes motrices en las direcciones x e y

S_{0x} y S_{0y} son las pendientes del suelo en las direcciones x e y

D_{1x} y D_{1y} son los términos de transferencia de impulso en las mismas direcciones.

La ecuación (1) expresa conservación de masa, mientras que las ecuaciones (2) y (3) garantizan la conservación del impulso en los ejes x e y , respectivamente. Las siguientes aproximaciones se introducen para los términos de transferencia de impulso debida a la infiltración:

$$D_{1x} = ui / 2 \quad (4)$$

$$D_{1y} = vi / 2 \quad (5)$$

Una expresión bidimensional de la conocida ecuación de Manning se utiliza para estimar la pendiente motriz:

$$S_{fx} = \frac{n^2 u (u^2 + v^2)^{1/2}}{h^{4/3}} \quad (6)$$

$$S_{fy} = \frac{n^2 v (u^2 + v^2)^{1/2}}{h^{4/3}} \quad (7)$$

La ecuación de Manning es una aproximación empírica a la pérdida de carga desarrollada para corrientes turbulentas. El coeficiente de aspereza n introduce empirismo en el modelo propuesto, aunque su uso es generalizado en los modelos de flujo superficial. Playán (1992) analizó el caso particular del riego por inundación desde una esquina de un cantero cuadrado. Durante la fase de avance sólo una pequeña parte del flujo es laminar (la parte más cercana al frente de avance). Una vez deja de entrar agua al cantero, el flujo pasa rápidamente a ser laminar.

En flujos laminares, la utilización de la ecuación de Manning resulta en una subestimación de la pendiente motriz, ya que en flujo laminar la pérdida de carga es proporcional a la velocidad, mientras que la ecuación de Manning usa el cuadrado de la velocidad. La utilización de esta ecuación puede, en ocasiones, inducir errores en la modelación del riego por superficie. Un problema adicional es la determinación del coeficiente de aspereza n , que no puede medirse directamente, pero cuyo valor puede obtenerse tabulado para diferentes condiciones de la superficie del suelo.

Finalmente, las siguientes expresiones se utilizan para evaluar la pendiente del suelo:

$$S_{ox} = -\frac{\partial z_0}{\partial x} \quad (8)$$

$$S_{oy} = -\frac{\partial z_0}{\partial y} \quad (9)$$

donde z_0 es la cota del suelo desde un nivel arbitrario de referencia (m).

Después de estas sustituciones, las ecuaciones de flujo se pueden expresar como:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} + i = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial z_0}{\partial x} \quad (11)$$

$$+ gn^2 \frac{p(p^2 + q^2)^{\frac{1}{2}}}{h^{\frac{7}{3}}} - \frac{p}{h} \left(\frac{i}{2} \right) = 0$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial z_0}{\partial y} \quad (12)$$

$$+ gn^2 \frac{q(p^2 + q^2)^{\frac{1}{2}}}{h^{\frac{7}{3}}} - \frac{q}{h} \left(\frac{i}{2} \right) = 0$$

Donde p es el caudal unitario en la dirección x (m^2/s), q es el caudal unitario en la dirección y (m^2/s). Las ecuaciones 10, 11 y 12 son conocidas como las ecuaciones en forma p - q .

Las variables p y q se relacionan con el calado y la velocidad del flujo de la siguiente manera:

$$p = uh \quad (13)$$

$$q = vh \quad (14)$$

Condiciones de contorno

Las ecuaciones en forma p - q resultan ser las más adecuadas para abordar la resolución numérica del problema, ya que presentan como variables dependientes el calado y el caudal (en sus dos componentes cartesianas). Esto es particularmente favorable, ya que las condiciones de frontera en el riego por superficie se establecen en términos de caudal, no en términos de velocidad. Así, el caudal en una toma es conocido y se puede frecuentemente considerar constante a lo largo de un riego, mientras que la velocidad depende de la relación entre calado y caudal.

La resolución numérica está basada en la discretización del dominio (que en este caso es el cantero). Para ello, se debe establecer una red de nudos en los que se resolverán las ecuaciones en forma p - q .

Definición del dominio. El proceso a seguir se basa en superponer una red regular sobre el plano del cantero y aproximar el contorno de éste con las células de la red. Las separaciones de la red en las direcciones del eje x (Δx) e y (Δy) pueden ser distintas, pero deben ser uniformes. Las condiciones de frontera imponen restricciones a los caudales unitarios en los nudos situados en los márgenes del cantero. En estos casos se considera nulo el flujo en la dirección perpendicular al borde del cantero. En los nudos situados en las esquinas, ambos componentes de caudal unitario son nulos.

Zonas de entrada de agua (tomas). Estas singularidades suponen condiciones particulares en los nudos afectados, en los que se debe especificar el valor de p y q que hacen que, en el conjunto de la zona, el caudal de entrada sea el deseado. Se definen en B2D tres tipos de zonas de entrada de agua: esquina, abanico y línea. La condición en esquina se corresponde con la existencia de una toma en una esquina en ángulo recto. La condición en abanico se corresponde con una toma situada en un margen recto del cantero, y la condición en línea representa la existencia de una zona de entrada de agua localizada en una determinada longitud de un margen recto. Esta condición se corresponde con la presencia de varias tomas pequeñas alineadas o con el riego desde una acequia que desborda lateralmente.

A efectos ilustrativos, se discute a continuación la determinación de los valores nodales de p y q para una zona de entrada de agua en abanico. En este tipo de entrada de agua, a pesar de tratarse de una entrada idealmente puntual, se necesitan dos nudos para su correcto planteamiento, tal como se indica en la Figura 1.

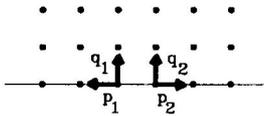


Figura 1. Configuración de la zona de entrada en abanico para el modelo propuesto.

En este caso particular, siendo Q el caudal total a aplicar en esta zona de entrada (m³/s), los valores de p y q en los nudos 1 y 2 de la citada figura se corresponden con las expresiones:

$$p_1 = -\frac{Q}{2\Delta x} \quad (15)$$

$$q_1 = -\frac{Q}{2\Delta x} \quad (16)$$

$$p_2 = -\frac{Q}{2\Delta x} \quad (17)$$

$$q_2 = -\frac{Q}{2\Delta x} \quad (18)$$

La condición inicial referida al calado del flujo se establece en un 5% superior al calado crítico correspondiente al caudal en el nudo, siguiendo la expresión:

$$h = 1.05 \left(\frac{p^2 + q^2}{g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (19)$$

Esquema numérico

En el modelo B2D se usa un procedimiento explícito en diferencias finitas basado en el esquema "Leapfrog" para resolver la ecuaciones en forma p-q. Las ecuaciones son resueltas en medios intervalos de tiempo, de modo que en tiempos $t + \frac{1}{2}\Delta t$ se resuelven la ecuaciones (11) y (12) para hallar los valores de p y q, mientras que en tiempos $t + \Delta t$ se resuelve la ecuación (10) para hallar h. De esta manera, el cálculo de la misma variable está siempre separado por un intervalo de tiempo entero, lo que satisface la condición de Courant-Friedrichs-Lewy siempre que, además, la longitud del intervalo de tiempo se calcule con la

siguiente expresión:

$$\Delta t = CN \min \left(\frac{\Delta x}{u+c}, \frac{\Delta y}{v+c} \right) \quad (20)$$

Donde CN es el número de Courant, para el que en este modelo se ha usado un valor de 0,8, y c es la celeridad de una pequeña perturbación gravitatoria del flujo (m/s). Nótese que Δt debe calcularse en cada intervalo de tiempo y para todos los nudos, tomándose el valor más restrictivo.

Las ecuaciones gobernantes son discretizadas utilizando aproximaciones en diferencias finitas de segundo orden. La discretización de la ecuación de conservación de masa lleva a la expresión:

$$\frac{h^{t+\Delta t} - h^t}{\Delta t} + \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} + i = 0 \quad (21)$$

de la que se puede despejar explícitamente el valor del calado en el intervalo de tiempo actual:

$$h^{t+\Delta t} = h^t - \Delta t \left(\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} + i \right) \quad (22)$$

La discretización de las ecuaciones de conservación de impulso produce las ecuaciones:

$$\begin{aligned} & \frac{p^{t+\frac{\Delta t}{2}} - p^{t-\frac{\Delta t}{2}}}{\Delta t} + \left(gh - \frac{p^2}{h^2} \right) \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{2p}{h} \frac{\partial p}{\partial x} \\ & - \frac{pq}{h^2} \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{q}{h} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{p}{h} \frac{\partial p}{\partial y} + gh \frac{\partial z_0}{\partial x} \\ & + gn^2 p \frac{(p^2 + q^2)^{\frac{1}{2}}}{h^{\frac{7}{3}}} - \frac{pi}{2h} = 0 \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} & \frac{q^{t+\frac{\Delta t}{2}} - q^{t-\frac{\Delta t}{2}}}{\Delta t} + \left(gh - \frac{q^2}{h^2} \right) \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{2q}{h} \frac{\partial q}{\partial y} \\ & - \frac{pq}{h^2} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{p}{h} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{q}{h} \frac{\partial p}{\partial x} + gh \frac{\partial z_0}{\partial y} \\ & + gn^2 q \frac{(p^2 + q^2)^{\frac{1}{2}}}{h^{\frac{7}{3}}} - \frac{qi}{2h} = 0 \end{aligned} \quad (24)$$

En las ecuaciones (23) y (24), las variables p y q son estimadas utilizando las siguientes expresiones:

$$p = \theta p^{t-\frac{\Delta t}{2}} + (1-\theta) p^{t+\frac{\Delta t}{2}} \quad (25)$$

$$q = \theta q^{t-\frac{\Delta t}{2}} + (1-\theta) q^{t+\frac{\Delta t}{2}} \quad (26)$$

donde θ es un parámetro al que se le asigna en este modelo el valor de 0,5.

El cálculo de los valores nodales de p y q resulta más complejo que el de h, ya que las ecuaciones (23) y (24) resultan ser implícitas. Por ello, resulta necesario utilizar un algoritmo de resolución como el de Newton-Raphson para conocer el valor de los caudales unitarios en el tiempo actual. Estos algoritmos utilizan las derivadas parciales de las ecuaciones respecto a las incógnitas para guiar de forma iterativa la búsqueda de las soluciones. Si se representa por f_1 , a la ecuación (23), y por f_2 a la ecuación (24), la expresión de las derivadas necesarias para avanzar la solución del problema en un intervalo de tiempo es:

$$\frac{\partial f_1}{\partial p^{t+\Delta t/2}} = \frac{1}{\Delta t} + \left(-\frac{2p}{h^2} \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{2}{h} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{q}{h^2} \frac{\partial h}{\partial y} \frac{1}{h} \frac{\partial q}{\partial y} \right) + gn^2 \frac{(p^2 + q^2)^{1/2} + \frac{p^2}{(p^2 + q^2)^{1/2}}}{h^{7/3}} - \frac{i}{2h} \quad (1-\theta) \quad (27)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial q^{t+\Delta t/2}} = \left(\frac{p}{h^2} \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{1}{h} \frac{\partial p}{\partial y} + gn^2 \frac{pq}{(p^2 + q^2)^{1/2}} \right) (1-\theta) \quad (28)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial p^{t+\Delta t/2}} = \left(\frac{q}{h^2} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{1}{h} \frac{\partial q}{\partial x} + gn^2 \frac{pq}{(p^2 + q^2)^{1/2}} \right) (1-\theta) \quad (29)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial q^{t+\Delta t/2}} = \frac{1}{\Delta t} + \left(-\frac{2q}{h^2} \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{2}{h} \frac{\partial q}{\partial y} - \frac{p}{h^2} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{1}{h} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + gn^2 \frac{(p^2 + q^2)^{1/2} + \frac{q^2}{(p^2 + q^2)^{1/2}}}{h^{7/3}} - \frac{i}{2h} \quad (1-\theta) \quad (30)$$

El método leapfrog permite resolver las ecuaciones de flujo de una manera relativamente sencilla, ya que al ser un método explícito, la resolución se hace nudo a nudo y no de manera global, evitando así la necesidad de resolver de manera iterativa complejos sistemas matriciales. El método es sólo ligeramente implícito en la resolución de los valores de p y q para cada nudo. Al tratarse de un esquema explícito la programación es simple, y la depuración del programa resultante es fácil.

Particular atención merece en este modelo el estudio de las condiciones iniciales. Cuando el calado es igual

a cero las ecuaciones de conservación de impulso resultan ser indeterminadas, por lo que no es posible resolverlas. Para evitar este problema se asigna a todos los nudos del dominio un calado inicial de 10^{-10} m. Con esto se consigue que la solución pueda avanzar en el tiempo, aunque se incurre en el error conceptual de considerar que todo el cantero está inicialmente cubierto por una lámina de agua de espesor despreciable. Esto plantea inconvenientes a la hora de coordinar los procesos de avance e infiltración, ya que si el calado es distinto de cero la infiltración debería comenzar en todos los nudos en el primer intervalo de tiempo, lo que está muy lejos de la realidad.

Para solucionar este problema, se toma un valor arbitrario del calado, que se considera como el umbral a partir del cual la infiltración comienza en un determinado nudo. Un valor de 10^{-3} m ha resultado ser adecuado para una gran variedad de casos y no ha introducido errores apreciables en los tiempos característicos del riego. La relación entre el calado inicial y el calado de inicio de la infiltración se ilustra en la Figura 2.

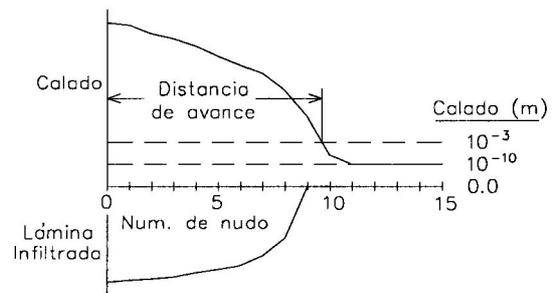


Figura 2. Relación entre el calado inicial y el calado de inicio de la infiltración.

Microtopografía

Las primeras aplicaciones del modelo B2D fueron destinadas a la modelación de canteros de riego por inundación perfectamente nivelados. Por ello, en estos casos, las derivadas espaciales de z_0 resultan ser nulas.

La extensión de B2D a la modelación de canteros de riego por superficie con pendiente espacialmente variada introduce cambios en las ecuaciones del flujo. Este caso particular se corresponde con la variabilidad espacial de la elevación presente en canteros a nivel, que revela la existencia de un patrón de suaves ondulaciones incluido dentro de un relieve generalmente llano. A esto es a lo que se refiere el término microtopografía.

La simulación del riego por superficie en canteros con microtopografía es una herramienta potencialmente

muy eficaz para estimar las mejoras introducidas por el perfeccionamiento de la explanación. Esta información resulta particularmente importante ahora que la explanación guiada por rayo láser se ha popularizado en la mayoría de las zonas de riego por superficie. Esta técnica de explanación, que quizá debería ser más propiamente considerada como de refinamiento de la superficie del campo, es generalmente aplicada a canteros en los que no se precisa modificar la pendiente general del suelo, sino que solamente se busca reducir la variabilidad espacial de su elevación.

Diversos autores han caracterizado la variabilidad espacial de la elevación obtenida por diversas técnicas de explanación. Bucks y Hunsaker (1987) y Leao de Sousa *et al.* (1993) utilizaron la desviación estándar de la elevación (DEE) de una muestra de puntos del cantero como criterio de calidad de la explanación. En ambos casos se cita una desviación estándar de aproximadamente 1 cm como característica de canteros explanados con equipos guiados por rayo láser.

La implementación de la variabilidad espacial de la elevación en los modelos de riego por superficie pasa por la medida de la elevación en una red irregular de puntos de coordenadas conocidas y la regionalización de esta variable a los nudos de la red regular utilizada para la resolución de las ecuaciones. El proceso de interpolación se puede realizar mediante la técnica del kriging (Samper y Carrera, 1990), que permite minimizar el error de estimación a la vez que obtener una estimación del error cometido en cada nudo. Una vez obtenido el valor de la elevación en los nudos de la red se calculan las pendientes locales en las direcciones x e y mediante aproximaciones en diferencias finitas de segundo grado.

CASO DE ESTUDIO: MICROTOPOGRAFÍA EN RIEGO POR INUNDACIÓN

Para ilustrar el funcionamiento del modelo, se propone el siguiente caso de estudio hipotético: Un cantero de riego por inundación de 100 x 100 m (1 ha) se riega desde su esquina noroeste con un caudal de 0,150 m³/s durante 90 minutos. La infiltración del suelo es la correspondiente a la familia de infiltración número 0,70 del Soil Conservation Service (textura franco-arcillo-limosa), utilizando los parámetros correspondientes a la ecuación de Kostiaikov-Lewis (Walker, 1989). El dominio se discretizó mediante una red de 21x21 nudos, separados en un marco de 5 x 5 m. Se asignó un valor de 0,04 al coeficiente de aspereza n de Manning.

En este caso de estudio, se analizan dos tipos de relieve. En primer lugar, una superficie completamente llana, y en segundo, una superficie en la que se presentan cuatro alteraciones locales del relieve: dos puntos altos y dos puntos bajos. La magnitud de las

cuatro alteraciones es de 2 cm respecto de la cota media del cantero.

El relieve del suelo se obtiene de interpolar mediante el método del inverso de la distancia al cuadrado, usando en cada nudo todos los puntos cuyas coordenadas se recogen en la Tabla 1. La Figura 3 es una representación en curvas de nivel de la microtopografía del caso de estudio. El relieve resultante no pretende ser representativo de la microtopografía existente en canteros de riego por inundación, sino que está destinado a presentar las capacidades del modelo y a mostrar cualitativamente los efectos de la microtopografía sobre el riego por inundación. En este sentido, cabe señalar que la desviación estándar del relieve resultante es de 0,92 cm, similar a la que presentan típicamente los canteros explanados con láser.

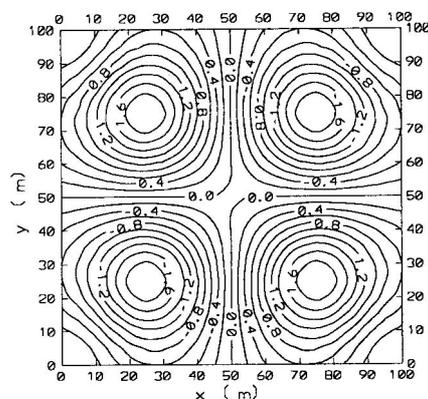


Figura 3. Representación en curvas del nivel de la microtopografía del caso de estudio propuesto.

Resultados y discusión

Las Figuras 4 y 5 son representaciones tridimensionales del calado del caso de estudio para el relieve llano y el relieve con microtopografía para tiempos de 20, 40, 60 y 80 minutos. En el caso del relieve llano se observa cómo antes de alcanzar las esquinas de coordenadas (0,0) y (100,100) el flujo es completamente radial y el frente de avance tiene forma de cuarto de circunferencia. El calado tiende a hacerse uniforme una vez que se ha completado el avance (tiempo 80 minutos).

En el caso con microtopografía se observan alteraciones en el calado que se corresponden con la existencia de zonas altas y bajas en el cantero. El flujo avanza rápidamente hacia las zonas bajas del cantero, deformando el frente de avance, que deja de tener la forma típica de cuarto de circunferencia. En las zonas bajas el calado es más elevado, de modo que la suma de la elevación del suelo y el calado produce un relieve similar al resultante de la simulación en suelo llano. En las zonas altas, el calado es siempre localmente más bajo por la misma causa.

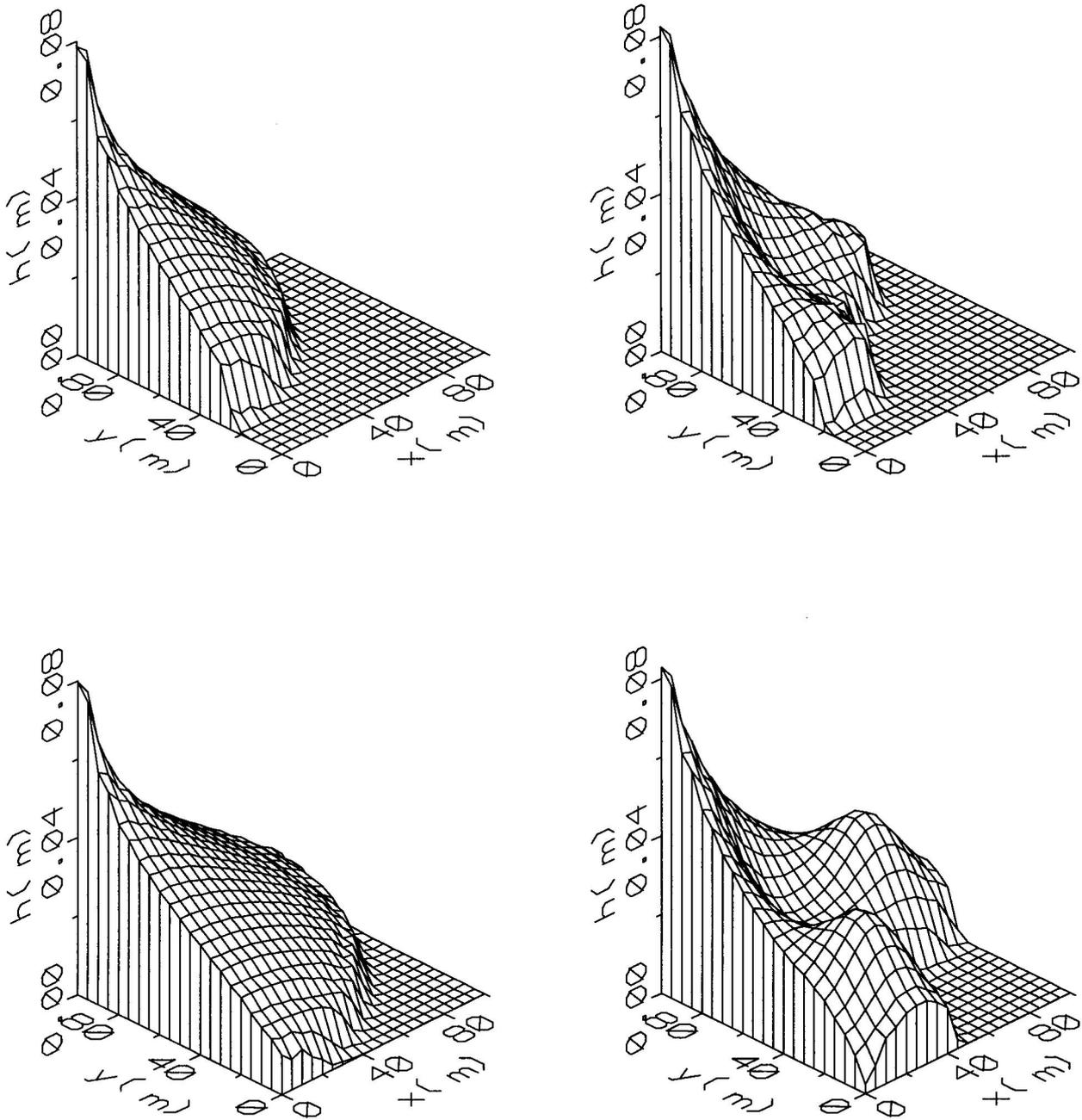


Figura 4. Representación tridimensional del calado para el caso de estudio con relieve llano (izquierda) y con microtopografía (derecha), para tiempos de 20 (superior) y 40 minutos (inferior)

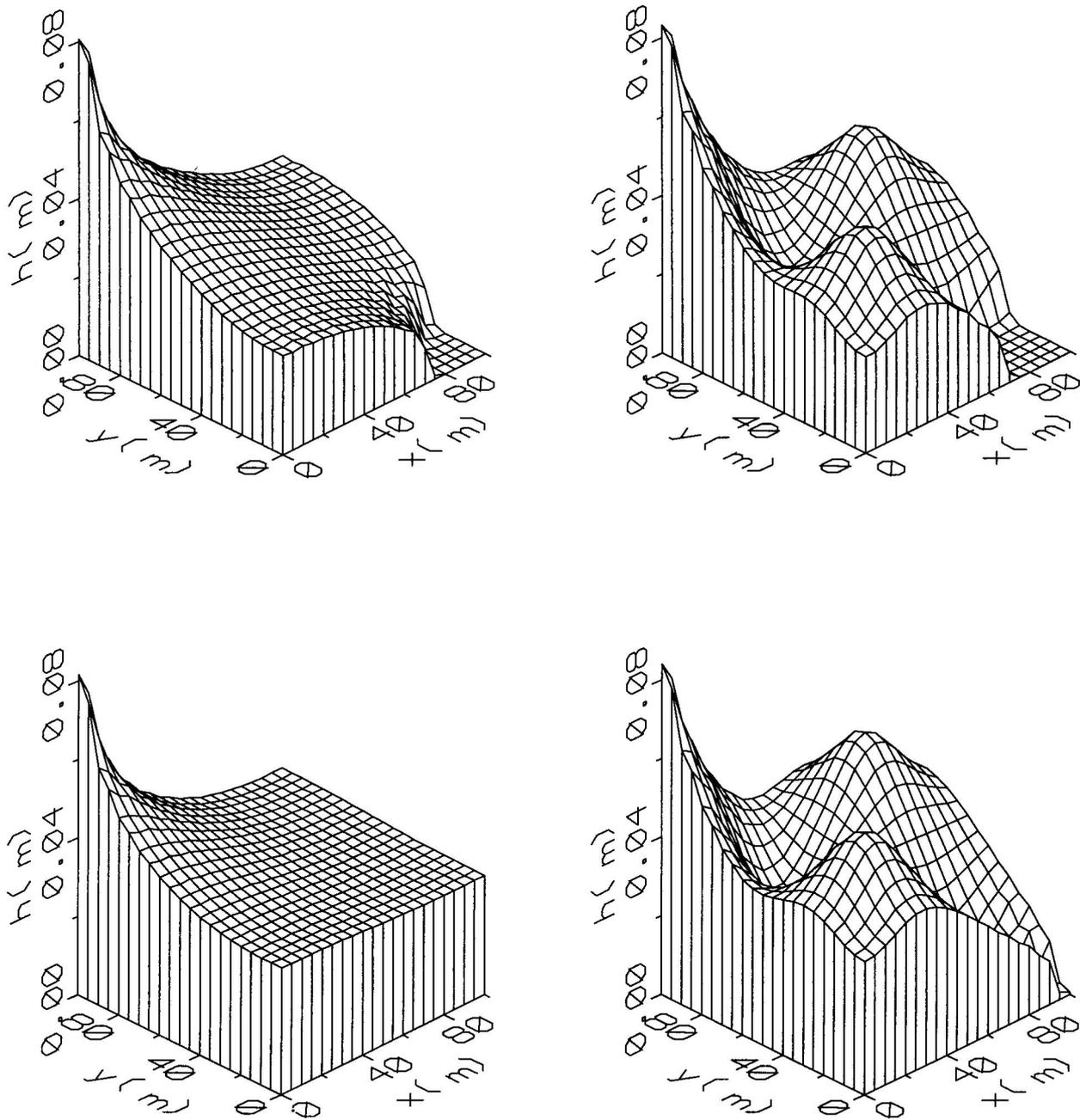


Figura 5. Representación tridimensional del calado para el caso de estudio con relieve llano (izquierda) y con microtopografía (derecha), para tiempos de 60 (superior) y 80 minutos (inferior)

La Figura 6 presenta las curvas de avance y receso para los dos relieves del caso de estudio. Durante las primeras fases del riego, el avance es más rápido para el relieve con microtopografía, debido a la favorable pendiente del suelo al inundar las zonas bajas centradas en (25,25) y (75,75). Sin embargo, hacia el final del avance, el agua debe cubrir la zona elevada alrededor de (75,25), por lo que el avance se retrasa y acaba siendo más lento que en el caso de relieve llano. La Tabla 2 presenta los tiempos e índices característicos del riego para los dos relieves. En ella se observa que el tiempo de avance es de 70,8 min para el relieve llano y 80,5 min para el relieve con microtopografía.

En cuanto al receso, en el caso del relieve llano, éste ocurre de manera simultánea en todos los nudos. Por ello, el tiempo de vaciamiento coincide con el tiempo de receso, tomando ambos un valor de 196,7 min. En el caso con microtopografía, la situación es muy distinta. Los puntos más elevados son los primeros en experimentar receso, mientras que el agua se acumula en las zonas bajas formando charcos que retrasan el fin de la fase de receso. El tiempo de vaciamiento es de 140,0 min, y el de receso de 250,0 min.

La existencia de esta fase de receso de 110 min de duración (que no aparece en el caso de relieve llano) es de suma importancia en los resultados del riego. Esta fase aumenta significativamente la variabilidad en el tiempo de contacto, lo que a su vez resulta en una mayor variabilidad en la lámina infiltrada final. Esto, a su vez, se traduce en una menor uniformidad y un menor rendimiento potencial.

La figura 7 presenta figuras tridimensionales de la lámina infiltrada en los dos casos de relieve. En el caso del relieve llano, la lámina infiltrada es mucho más uniforme, ya que en el caso con microtopografía se observa cómo las zonas localmente elevadas reciben menos agua y las zonas localmente bajas más. Esto se refleja fielmente en los índices de idoneidad del riego recogidos en la tabla 2. La uniformidad absoluta (UA) se calcula como relación porcentual entre la dosis de riego recibida en el nudo que menos agua recibe y la dosis media de riego. La uniformidad de distribución (UD) es la relación porcentual entre la dosis media de riego recibida en el 25% de los nudos que menos agua reciben y la dosis media de riego. Finalmente, el rendimiento potencial del cuarto bajo (RPCB) es el rendimiento correspondiente a una dosis de riego igual a la dosis media recibida en el 25% de los nudos que menos agua reciben. La microtopografía hace disminuir la UA del 80,7% al 56,1%; la UD del 89,7% al 77,7%, y RPCB del 89,6% al 76,6%.

Esta disminución del rendimiento potencial (de un 13%) es debida únicamente a la introducción de un relieve que se puede calificar de moderado. A pesar de que este caso de estudio sólo tiene una importancia

Tabla 1. Coordenadas x, y y Z_0 empleadas para generar el relieve del cantero estudiado

$x(m)$	$y(m)$	$z_0(m)$
0,0	0,0	0,00
100,0	0,0	0,00
25,0	25,0	-0,02
75,0	25,0	0,02
25,0	75,0	0,02
75,0	75,0	-0,02
0,0	100,0	0,0
100,0	100,0	0,0

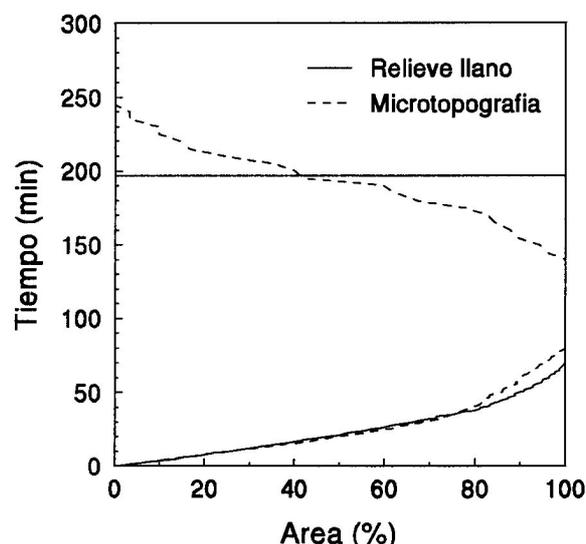


Figura 6. Curvas de avance y receso para el caso de estudio con relieve llano (línea continua) y con microtopografía (línea rayada)

cuantitativa, hay que destacar que la introducción de esta nueva variable en los modelos de riego por superficie puede introducir cambios cuantitativos importantes en los resultados de la simulación, acercándolos a lo que sucede en la realidad.

Estos cambios son de sobra conocidos por los agricultores españoles y de todo el mundo, que usan la explanación guiada con rayo láser para conseguir avances más rápidos, mayor uniformidad de riego (particularmente cuando se trata del riego anterior a la siembra, en cuyo caso la uniformidad de riego se traduce en uniformidad en la nascencia), mayor rendimiento del riego, y con ello ahorro de agua de riego.

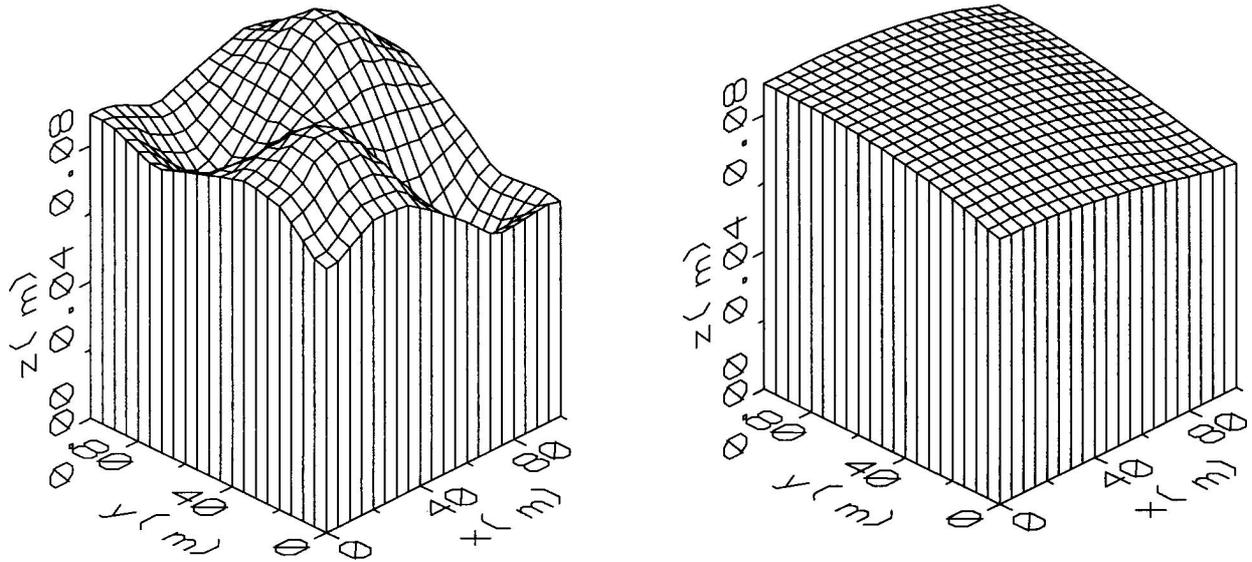


Figura 7. Representación tridimensional de la lámina infiltrada al final del riego para el caso de estudio con relieve llano (izquierda) y con microtopografía (derecha)

Tabla 2. Tiempos e índices característicos del riego del caso de estudio para el relieve llano y el relieve con microtopografía

Parámetro	Relieve	
	Llano	Microtopografía
Tiempo de avance (min)	70,8	80,5
Tiempo de vaciamiento (min)	196,7	140,0
Tiempo de receso (min)	196,7	250,0
UA (%)	80,7	56,1
UD (%)	89,7	77,7
RPCB (%)	89,6	76,6

El modelo ha resultado ser numéricamente estable en todas las condiciones ensayadas, y el error en el balance de volumen se estabilizó rápidamente en valores inferiores al 0,02% en la simulación con los dos relieves.

CONCLUSIONES

La extensión de B2D aquí presentada puede contribuir a acercar los modelos actuales de riego por superficie a la realidad. La introducción en estos modelos de la variabilidad espacial de variables como la elevación del suelo y de las propiedades físicas del suelo, particularmente la infiltración, puede suponer una

mejora sustancial en la capacidad predictiva de parámetros como la uniformidad y el rendimiento del riego, que son difícilmente medibles en campo.

Sin embargo, la introducción de estas nuevas variables supone un aumento considerable en el volumen de datos necesarios para llevar a cabo un simulación, por lo que estos modelos podrían resultar poco prácticos. Una solución conciliadora podría entrañar la utilización de modelos como el propuesto para establecer relaciones funcionales empíricas entre la microtopografía y la aficción a los tiempos e índices característicos del riego. Estas relaciones se podrían establecer de la siguiente manera:

$$\frac{x_m}{x_0} = f(DEE, n, i, Q, A, etc.) \tag{31}$$

donde X representa a uno de los tiempos característicos o índices de idoneidad del riego, el subíndice m significa en presencia de microtopografía, el subíndice 0 significa en un relieve llano, A es el área del cantero y f es la función que relaciona las variables.

Estas relaciones permitirían conocer para un caso concreto la evolución de la uniformidad y el rendi-

miento del riego en función de la DEE calculada a partir de la elevación medida en un número de puntos del cantero. El técnico podría decidir cuándo utilizar la explicación con láser en función del balance económico entre el coste de la labor y el agua ahorrada.

SÍMBOLOS Y TERMINOLOGÍA

A	=	Área del cantero (m ²)
c	=	Celeridad de una pequeña perturbación gravitatoria (m/s).
CN	=	Número de Courant.
DEE	=	Desviación estándar de la elevación del suelo (cm).
D _{1x}	=	Término de impulso asociado a la infiltración en el eje x (m ² /s ²).
D _{1y}	=	Término de impulso asociado a la infiltración en el eje y (m ² /s ²).
RPCB	=	Rendimiento potencial del cuarto bajo (%)
f	=	Función genérica
f ₁	=	Ecuación discretizada de conservación de impulso en el eje x
f ₂	=	Ecuación discretizada de conservación de impulso en el eje y
g	=	Aceleración de la gravedad (m/s ²)
h	=	Calado del agua (m)
i	=	Velocidad de infiltración (m/s)
n	=	Coefficiente de aspereza de Manning
p	=	Caudal unitario en la dirección del eje x (m ² /s)
q	=	Caudal unitario en la dirección del eje y (m ² /s)
Q	=	Caudal (m ³ /s)
S _{0x}	=	Pendiente del suelo en la dirección del eje x
S _{0y}	=	Pendiente del suelo en la dirección del eje y
S _{fx}	=	Pendiente motriz en la dirección del eje x
S _{fy}	=	Pendiente motriz en la dirección del eje y
t	=	Tiempo (s)
u	=	Velocidad del agua en la dirección del eje x (m/s)
UA	=	Uniformidad absoluta (%)
UD	=	Uniformidad de distribución (%)
v	=	Velocidad del agua en la dirección del eje y (m/s)
x	=	Coordenada espacial (m)
X ₀	=	Tiempo o índice característico del riego en ausencia de microtopografía

X _m	=	Tiempo o índice característico del riego en presencia de microtopografía
y	=	Coordenada espacial (m)
Z	=	Profundidad infiltrada (m)
z ₀	=	Elevación del suelo (m)
∂	=	Derivada parcial
T	=	Tiempo de contacto (min)
θ	=	Factor de ponderación temporal en la discretización por diferencias finitas

REFERENCIAS

- Akanbi, A. A. y Katopodes, N. D. (1988) *Model for flood propagation on initially dry land*, J. Hyd. Div. (ASCE), 114(HY7), 689-706.
- Bucks, D. A. y Hunsaker, D. J. (1987) *Water use variability in irrigated level basins*, Transactions of the ASAE, 30(4), 1090-1098.
- Katopodes, N. D. y Streikoff, T. (1977) *Hydrodynamics of border irrigation - complete model*, J. Irrig. Drain. Div. (ASCE), 103(IR3), 309-323.
- Leão de Sousa, P., Countinho, J. M. y Baguinho de Sousa, J. M. (1993) *O nivelamento de precisão e a sua manutenção. Condições essenciais para a automatização da rega de superfície*, En: Desenvolvimento de equipamentos mecanizados para rega de gravidade. P. Leão de Sousa and M. R. Cameira, Eds. ISA/DER, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal. 149 pp.
- Playan, E. (1992) Two dimensional hydrodynamic simulation of basin irrigation: analysis of field shape effects on irrigation performance, Ph. D. thesis, Utah State University. 143 pp.
- Playán, E., Walker, W. R. y Merkley, G. P. (1994a) *Two-dimensional simulation of basin irrigation. I: Theory*, J. Irrig. Drain. Div. (ASCE), 120(5):837-856.
- Playán, E., Walker, W. R. y Merkley, G. P. (1994b) *Two-dimensional simulation of basin irrigation. II: Applications*, J. Irrig. Drain. Div. (ASCE), 120(5):857-870.
- Samper, F. J. y Carrera, J. (1990) Geoestadística: Aplicaciones a la hidrología subterránea, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona, España. 484 pp.
- Walker, W. R. (1989) Guidelines for designing and evaluation surface irrigation systems. FAO irrigation and drainage paper 45. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, Italia. 137 pp.