

OPTIMIZACIÓN DEL PERFIL DEL SUELO PARA AHORRAR AGUA EN EL RIEGO SUPERFICIAL

González Cebollada, C.¹, Moret Fernández, D.², Martínez Chueca, V.³

^{1,3} Área Mecánica Fluidos, Universidad de Zaragoza, EPS Crta. Cuarte s/n 22197 Huesca, cesargon@unizar.es

² Departamento de Suelo y Agua, Estación Experimental Aula Dei, CSIC. Apdo. 202, 50080 Zaragoza, david@eead.csic.es

Resumen

Este trabajo presenta y aplica una nueva metodología, llamada *chinachana*, que permite conocer la forma topográfica óptima de un campo de riego superficial, en cuanto al aprovechamiento del agua de riego.

Para cualquier variante del riego superficial (tablar o surco, con final abierto o cerrado), la metodología permite conocer la forma curva de un campo de riego que hace que el agua de riego se distribuya homogéneamente, tomando como datos los parámetros de infiltración, el coeficiente de Manning, el caudal de riego (que ha de ser suficientemente alto), la geometría del campo y la dosis de riego.

La metodología se basa en elevar topográficamente los puntos del campo con mayor infiltración, para así disminuirla, y en bajar topográficamente los puntos con menor infiltración, para así aumentarla. De este modo, en un proceso iterativo, se consigue homogeneizar la infiltración, alcanzándose teóricamente un riego superficial uniforme.

La metodología se aplica a seis casos diferentes, mostrándose gráficamente los resultados obtenidos y las formas óptimas alcanzadas. Para ello, se recurre a tres programas de simulación hidráulica del riego superficial (POZAL, WinSRFR y B2D).

En la parte final, se discute la metodología con especial énfasis en la aplicación práctica de sus resultados, concluyéndose que pueden ser útiles cuando el agua para el riego superficial es un bien escaso o caro.

1.- Introducción y objetivos.

En el riego superficial, la principal pérdida de agua a nivel de parcela es la percolación profunda (y la escorrentía superficial si el final del campo es abierto). En general, el riego superficial no es uniforme porque las zonas más cercanas a los puntos de entrada de agua reciben más aportación de agua. En cualquier variante del riego superficial (tablar o surco, con final abierto o cerrado), la uniformidad de distribución es menor que en los sistemas de riego a presión (goteo, aspersión) (FAO, 2002; Walker y Skogerboe, 1987). La creciente necesidad de ahorrar agua (cambio climático, superpoblación) y las modernas técnicas disponibles de nivelación de parcelas de riego (láser, GPS) justifican el estudio de la influencia de la forma de la superficie campo en la uniformidad del riego (Playán et al., 1996).

Para evitar en la medida de lo posible la pérdida de agua por percolación profunda, este estudio analiza la influencia del perfil de la superficie de suelo sobre la uniformidad de distribución del agua y otros indicadores de la eficiencia del riego.

Para ello, se presenta y aplica una nueva metodología (llamada *chinachana*) que permite encontrar la mejor forma del perfil longitudinal del suelo para *ayudar al*

agua a distribuirse uniformemente por el campo, en función de los parámetros de infiltración, el coeficiente de rugosidad de Manning, el caudal de riego, la geometría del campo y la dosis de riego.

Desde un punto de vista hidráulico, las aplicación de las leyes físicas al movimiento del agua en lámina libre conducen a ecuaciones no lineales, de modo que su dinámica y la relación entre sus variables mantiene esta no linealidad. No obstante, es posible conseguir *comportamientos lineales del agua* adoptando geometrías no lineales que, superpuestas a la no linealidad de la dinámica del agua, den como resultado un comportamiento lineal en alguna relación de variables. Esto es lo que sucede (figura 1) con la clepsidra (reloj de agua que puede tener una curvatura tal que la velocidad de descenso del agua es constante), el vertedero sutro o proporcional (cuya forma particular consigue una relación lineal entre el caudal de vertido y el calado aguas arriba) y, tal como se presenta en este artículo, la forma óptima de un campo de riego (que consigue una infiltración constante en todo el campo).

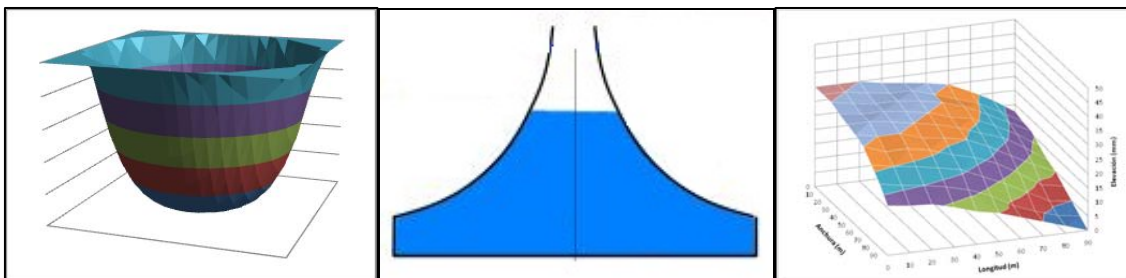


Figura 1. Ejemplos de geometrías no lineales para *linealizar* el comportamiento del agua: clepsidra, vertedero sutro y campo de riego superficial.

2.- Materiales y Métodos

Para abordar el objetivo principal se utilizaron tres modelos de simulación hidráulica del riego superficial: POZAL, WinSRFR y B2D. El primero ha sido desarrollado específicamente para este trabajo y aplica el modelo hidráulico completo de las ecuaciones unidimensionales de flujo en lámina libre (ecuaciones de Saint-Venant), utilizando el método de diferencias finitas según el esquema de McCormack (Dholakia et al., 1998; García-Navarro et al., 1992). El segundo programa, desarrollado por el Arid-Land Agricultural Research Center del Departamento de Agricultura de EE.UU., utiliza el modelo de cero-inercia para la resolución de las ecuaciones de Saint-Venant mediante el método de diferencias finitas, aunque para pendientes pronunciadas aplica un modelo de onda cinemática (Bautista et al., 2009a, 2009b). Por último, el programa B2D es un programa de simulación hidráulica bidimensional del riego superficial, que aplica igualmente el método de diferencias finitas para resolver las ecuaciones bidimensionales de flujo en lámina libre, a través del esquema explícito de *leapfrog*. El programa B2D fue publicado en la Universidad del Estado de Utah, EE.UU. (Playán et al., 1994a, 1994b).

Para alcanzar el objetivo planteado, se ha desarrollado una nueva metodología llamada *chinachana*, con el fin de encontrar un perfil de superficie de suelo teóricamente perfecto en cada caso en particular. Esta metodología, a través de un proceso iterativo, conduce a un perfil de superficie de suelo curvo que obtiene teóricamente una uniformidad de distribución (*DU*, *distribution uniformity*) del 100% sin percolación profunda en cualquier variante de riego superficial, siempre que el caudal de riego esté por encima de un determinado umbral. La uniformidad de distribución se define como el cociente entre la infiltración mínima y la infiltración promedio.

En cada iteración del método *chinachana*, se eleva topográficamente la parte del campo que ha recibido más agua en la simulación anterior, y se baja topográficamente la parte del campo que ha recibido menos agua en la simulación anterior. Hechas ambas modificaciones del perfil del suelo, se realiza una nueva simulación hidráulica ajustando el tiempo de riego para que la infiltración mínima (Z_{min}) coincida con la infiltración requerida o dosis de riego (Z_{req}). La repetición iterativa de estas operaciones conduce a una evolución de la forma del perfil del suelo hasta conseguir una uniformidad de distribución del agua teóricamente perfecta. Se detalla a continuación cada uno de los pasos de la metodología *chinachana*.

Paso 1. Leer datos. Se toman como datos los parámetros de infiltración, el coeficiente de Manning, el caudal de riego, la geometría del campo a regar y la dosis de riego. En el caso de riego por surcos, se debe conocer además los parámetros geométricos correspondientes. La topografía inicial del terreno se considera horizontal.

Paso 2: Ajustar tiempo de riego. A través de una herramienta de simulación hidráulica, ajustar mediante tanteo el tiempo de riego de manera que no haya déficit hídrico ni exceso de riego, es decir, que se cumpla $Z_{min}=Z_{req}$. En tal circunstancia, detectar el punto del campo con mayor infiltración, el punto con menor infiltración, así como calcular la uniformidad de distribución y otros indicadores del riego.

Paso 3: Si el riego es uniforme, entonces parar. En el momento que la uniformidad de distribución alcanza el valor deseado, el proceso finaliza y los resultados se guardan.

Paso 4: Elevar el punto con mayor infiltración. Se aumenta la cota del punto con mayor infiltración, para que ésta disminuya.

Paso 5: Bajar el punto con menor infiltración. Se disminuye la cota del punto con menor infiltración, para que ésta aumente. Este paso se omite cuando el final del campo está abierto porque puede implicar la disminución permanente de la cota del último punto del campo, produciéndose una elevada escorrentía superficial.

Paso 6: Ir al paso 2. Se cierra el bucle del proceso iterativo.

Este proceso iterativo tiende a mejorar la uniformidad de distribución a medida que la topografía del campo varía. En los pasos 4 y 5, la cantidad de cota a subir o a bajar debe adecuarse al grado de refinamiento de la solución buscada. El proceso iterativo resulta más rápido si en los primeros pasos se elevan y bajan cantidades mayores, para luego establecer cantidades menores con el objeto de perfilar mejor y suavizar la forma final del campo optimizado.

No siempre existe una forma ideal del campo que consigue una uniformidad de distribución teórica del 100%. Cuando el caudal de riego (Q_{in} , que se supone constante) es demasiado bajo, el tiempo de corte (t_{co} , *cutoff time*) puede resultar mayor que el tiempo necesario para que se infiltre la altura de agua requerida (t_{req}). En tal caso, en la cabecera del campo la infiltración será mayor que la requerida y el riego ya no podrá ser completamente uniforme, siempre existirá percolación profunda. Por ello, para que pueda existir una uniformidad de distribución del 100%, se ha de cumplir

$$t_{co} < t_{req} \quad (1)$$

El tiempo t_{req} puede ser conocido a partir de la función de infiltración y de la altura de agua requerida (Z_{req}). Por ejemplo, si la infiltración se modeliza a través de la función de Kostiakov (1932),

$$z = k \cdot t^a \quad (2)$$

donde z es la altura de agua infiltrada, t es el tiempo de oportunidad y k y a son dos constantes, se tiene que

$$t_{req} = \sqrt[a]{Z_{req}/k} \quad (3)$$

Por otro lado, en un evento de riego el volumen de agua aplicado al campo es

$$V_{in} = Q_{in} \cdot t_{co} \quad (4)$$

mientras que el volumen de agua requerido resulta ser

$$V_{req} = z_{req} \cdot S \quad (5)$$

siendo S la superficie del campo. En un riego completamente uniforme, el volumen de agua aplicado ha de ser igual al volumen de agua requerido, por lo que

$$V_{in} = V_{req} \Rightarrow Q_{in} \cdot t_{co} = z_{req} \cdot S \Rightarrow t_{co} = \frac{z_{req} \cdot S}{Q_{in}} \quad (6)$$

Este tiempo es el tiempo óptimo de riego (t_{opt}), capaz de aportar al campo el agua que estrictamente necesita. Sustituyendo (6) en (1), se llega a

$$Q_{in} > \frac{z_{req} \cdot S}{t_{req}} \quad (7)$$

Es decir, el caudal de riego debe satisfacer la expresión (7) para poder conseguirse una distribución completamente uniforme del riego. En el caso unidimensional, esta expresión se transforma en

$$q_{in} > \frac{z_{req} \cdot L}{t_{req}} \quad (8)$$

donde q_{in} es el caudal unitario de riego (caudal por unidad de anchura) y L es la longitud del campo.

Así, la restricción expresada en (7) y (8) permite saber a priori, en un caso particular, si puede existir una forma ideal del campo que consigue una distribución uniforme del riego o no. Si el caudal aplicado es mayor que el *caudal límite*, puede existir, si es menor, no (entendiendo por *caudal límite* el segundo miembro de las inecuaciones (7) y (8)).

Por otro lado, la expresión (6) permite establecer también a priori el tiempo de corte necesario para una uniformidad perfecta. Basado en esto, una metodología equivalente a la metodología *chinachana* podría establecerse. El proceso iterativo sería similar, pero estableciendo un tiempo de riego fijo según la expresión (6). Esta metodología resultaría más rápida que la aquí expuesta, pero tiene dos inconvenientes: por un lado, la imprecisión del método de diferencias finitas en la resolución de las ecuaciones de Saint Venant impide alcanzar la solución exacta, que tiene el tiempo de riego marcado en (6) y, por otro lado, en campos con final abierto el tiempo de riego se aleja bastante del marcado en (6) por causa de la escorrentía superficial.

3.- Resultados

La metodología *chinachana* se ha aplicado a seis casos de riego superficial, descritos en la Tabla 1. En ella, para cada uno de los casos, se especifica el programa de simulación empleado para la aplicación de la metodología junto con su carácter unidimensional o bidimensional, el sistema de riego superficial (tablar o surco), el estado del final del campo (abierto o cerrado) y, por último, una referencia al origen de los datos utilizados.

Tabla 1. Casos de estudio. Descripción.

Caso	Programa	Sistema de riego	Final del campo	Origen de datos
1	POZAL (1D).	Tablar	Cerrado	Caso 1 de Dholakia et al. (1998)
2	WinSRFR (1D)..	Tablar	Cerrado	<i>SRFRexamples.sfr</i> de WinSRFR 3.1
3	WinSRFR (1D)..	Tablar	Abierto	Caso 2 pero con final abierto
4	WinSRFR (1D)..	Surco	Cerrado	<i>Basin-Border-Furrow.sfr</i> WinSRFR 3.1
5	WinSRFR (1D)..	Surco	Cerrado	Caso 3 pero con más caudal
6	B2D (2D)	Tablar	Cerrado	Basado en <i>Demo2.b2d</i> de B2D

Tabla 2. Casos de estudio. Datos.

Caso	Dimensiones (m)	Caudal de riego	Dosis riego (mm)	Manning (s/m ^{1/3})	Funcion de infiltración
1	185.9	10.93 l/s/m	100	0.10	$z(\text{mm})=73.72 \cdot t(\text{h})^{0.6}$
2	182.88	2.323 l/s/m	50.8	0.15	$z(\text{mm})=25.23 \cdot t(\text{h})^{0.748} + 7$
3	182.88	2.323 l/s/m	50.8	0.15	$z(\text{mm})=25.23 \cdot t(\text{h})^{0.748} + 7$
4	350	0.714 l/s/sur.	90	0.04	$z(\text{mm})=30.1 \cdot t(\text{h})^{0.5}$
5	350	1.2 l/sur.	90	0.04	$z(\text{mm})=30.1 \cdot t(\text{h})^{0.5}$
6	90x90	60 l/s	50	0.04	$z(\text{m})=0.032 \cdot t(\text{min})^{0.504} + 1.17 \text{e-}4 \cdot t(\text{min})$

En la Tabla 2, para los mismos casos presentados en la Tabla 1, se especifican: las dimensiones del tablar o surco (longitud en los casos adimensionales y longitud y anchura en el caso bidimensional); el caudal de riego (por unidad de anchura en los tablares unidimensionales, por surco en el riego por surcos y total en el caso bidimensional); las dosis de riego, el coeficiente de Manning y las diferentes funciones de infiltración empleadas. En los casos de riego por surcos (casos 4 y 5), los surcos son de sección trapecial, con anchura en el fondo de 150 mm, altura de 100 mm y pendiente del talud de 2.

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos para cada uno de los casos estudiados, tras aplicar la metodología *chinachana*.

Caso 1: Tablar unidimensional (I), final cerrado.

Este primer caso ha sido abordado con el programa POZAL, que *automáticamente* concluye el proceso iterativo en unos 14 minutos de tiempo. El resto de los casos que se presentan conllevan una aplicación *manual* de la metodología *chinachana*.

La figura 2 muestra los resultados del caso 1 en tres gráficos diferentes: el primero de ellos muestra la evolución de la uniformidad de distribución, el tiempo de corte y la percolación profunda (DP, *deep percolation*) a lo largo del proceso iterativo de la metodología *chinachana*; el segundo gráfico muestra el diagrama de avance y receso para las situaciones inicial y final del proceso; el tercer gráfico muestra la forma final del campo optimizado topográficamente, así como el proceso de infiltración con el perfil optimizado, junto con la infiltración final del campo sin pendiente.

Para este caso, se ha realizado un video que muestra la evolución del perfil del suelo a lo largo del proceso iterativo, partiendo del suelo horizontal y llegando hasta el perfil optimizado. Este video se encuentra disponible en la URL <http://www.youtube.com/watch?v=mNozM1rTDMk>

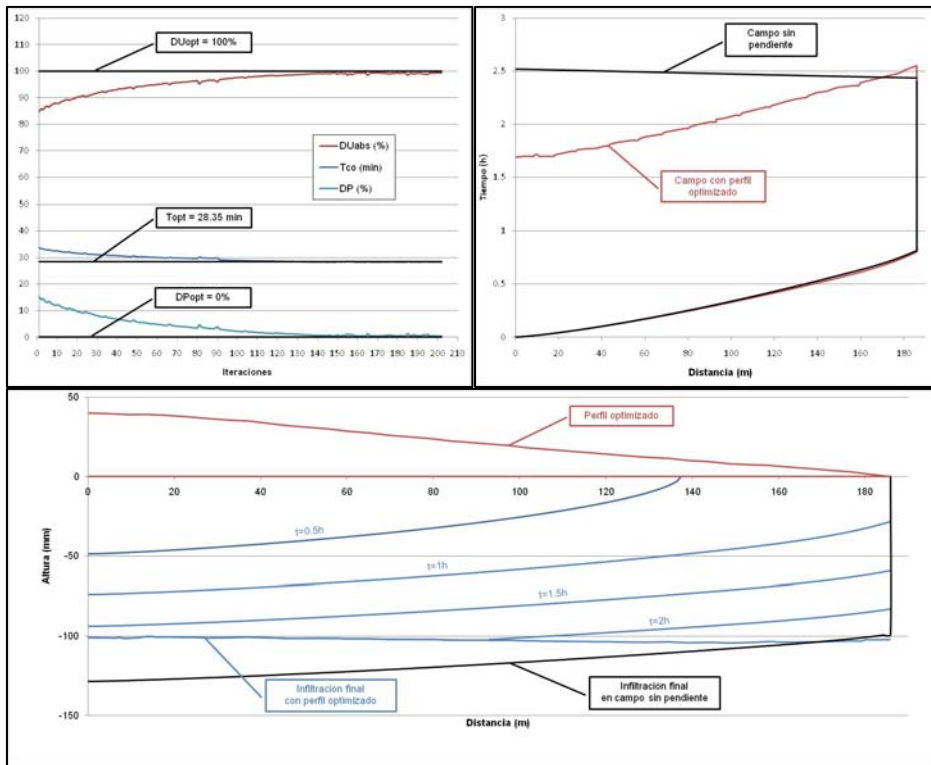


Figura 2. Caso 1: evolución de indicadores, diagrama de avance-receso y perfiles.

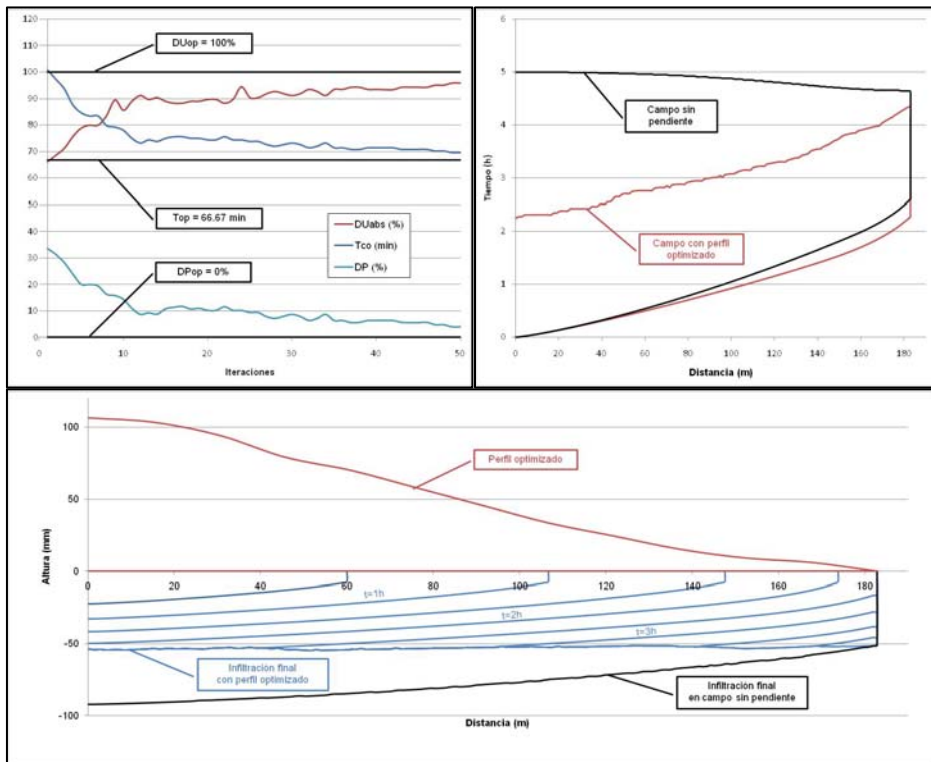


Figura 3. Caso 2: evolución de indicadores, diagrama de avance-receso y perfiles.

Nótese el paralelismo existente entre la curva de avance y la de receso del perfil optimizado. Esto indica que los tiempos de oportunidad (los tiempos durante los cuales hay infiltración) de todos los puntos son similares. Ello conduce al perfil final de infiltración prácticamente horizontal y coincidente con la altura requerida que se observa en el tercer gráfico de la figura 2.

Caso 2: Tablar unidimensional (II), final cerrado.

En este segundo caso se analiza otro tablar con final cerrado, esta vez con el programa WinSRFR. El número de iteraciones realizadas es menor que en el caso anterior, observándose resultados similares en la figura 3.

En este resultado, se observa una forma final con más pendiente que en el caso 1; debida a que el caudal de riego es menor en este segundo caso. Esta circunstancia también conduce a un mayor ahorro de agua y de tiempo de riego entre las situaciones inicial y final, como se verá en el apartado de resultados, ya que un caudal pequeño sobre un campo sin pendiente produce una uniformidad de distribución pobre.

Caso 3: Tablar unidimensional (II), final abierto.

Ahora se analiza el caso 2 pero con el final abierto, permitiendo la escorrentía superficial al final del campo.

Cuando el final del tablar es abierto, no puede existir una forma ideal del campo que permita aprovechar todo el agua de riego, ya que inevitablemente se producirá escorrentía superficial durante todo el tiempo en que esté infiltrando agua el punto final del campo, que al menos debe ser de t_{req} . La cantidad de agua que salga del campo durante este tiempo dependerá de la forma en que se produzca esta salida, que puede modelizarse, por ejemplo, como un flujo uniforme o como un vertido.

La metodología *chinachana* aplicada a un caso de estas características puede resultar, no obstante, útil en determinados casos, ya que permite obtener una situación final en la que no se produce percolación profunda, como puede observarse en la figura 4. La evolución del perfil topográfico del suelo conduce, como se observa en el primer gráfico, a una disminución de la percolación profunda y a un aumento de la escorrentía superficial (RO, *runoff*). La uniformidad de distribución tiende a aumentar buscando su valor máximo del 100%.

Así, en los casos en los que la escorrentía superficial no suponga realmente una pérdida de agua (bien por reutilización aguas abajo, bien por devolución a un cauce, bien por bombeo al comienzo del campo), la metodología *chinachana* puede resultar útil al ofrecer como resultado un riego sin percolación profunda teóricamente, a costa de un aumento de la escorrentía superficial.

Al igual que en el resto de casos, en el primer gráfico se muestran las asíntotas de las evoluciones de los parámetros: DU tiende a 100%, DP tiende a 0% y T_{co} tiende al tiempo óptimo de riego calculado según la expresión (6).

Caso 4: Surco con caudal insuficiente.

En este caso, se riega un surco con final cerrado y aplicando un caudal de riego menor que el caudal límite (0.714 l/s frente a 0.989 l/s). Como se ha demostrado anteriormente, esto hace imposible conseguir un perfil óptimo del campo, ya que en cabecera el tiempo de oportunidad será mayor que t_{req} , por lo que la infiltración será superior a z_{req} .

No obstante, la metodología *chinachana* también puede resultar útil para mejorar los indicadores del riego. Observando el primer gráfico de la figura 5, se aprecia un aumento inicial de DU acompañado de una disminución de DP. Posteriormente, los indicadores se estabilizan conforme el proceso evoluciona.

La metodología evoluciona proporcionando perfiles con pendientes excesivas en cabecera y con poca pendiente al final del campo. En particular, en la iteración 120 la pendiente promedio del campo es del 10%, completamente excesiva. Por ello, observando la evolución del perfil del campo y de los indicadores de la figura 5, se debe adoptar un compromiso entre la pendiente máxima del campo y los indicadores del riego. El resultado de la iteración 20 tiene una pendiente promedio de 1.22‰ y ofrece buenos indicadores. Sus resultados se ofrecen en el segundo y tercer gráfico de la figura 5.

Aún sin ser un riego perfecto, se consigue disminuir la percolación profunda desde un 30.5% hasta un 15.5%, con un ahorro de agua y de tiempo de riego del 17.7%.

El perfil que se observa en el tercer gráfico de la figura 5 resulta algo abrupto debido a que la cantidad de cota que se sube y se baja en cada iteración es grande. La forma quedaría más suavizada si tal cantidad hubiera sido menor.

Caso 5: Surco con caudal suficiente.

Ahora se aumenta el caudal hasta 1.2 l/s, sobrepasándose el caudal límite, de manera que ahora sí que puede existir la forma perfecta del campo.

A la vista de la figura 6, se constata que el método *chinachana* alcanza tal forma en pocas iteraciones. La pendiente promedio de la solución alcanzada es de $3.83 \cdot 10^{-4}$ y el calado máximo del agua en el surco (147 mm), que sucede en el extremo aguas abajo, no sobrepasa la profundidad del surco (300 mm).

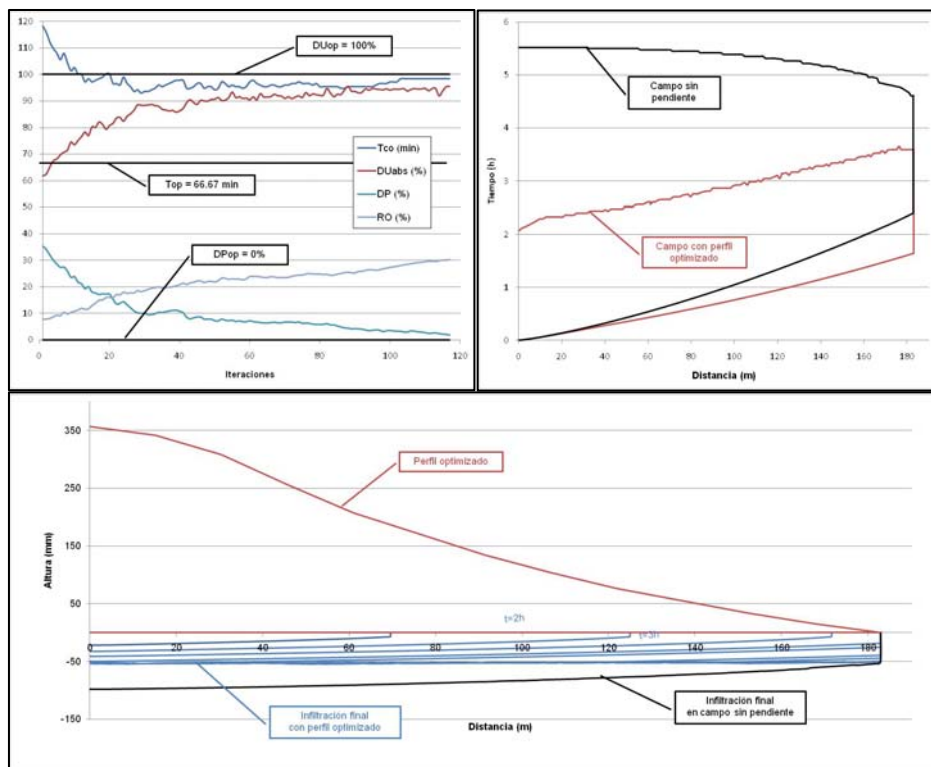


Figura 4. Caso 3: evolución de indicadores, diagrama de avance-receso y perfiles.

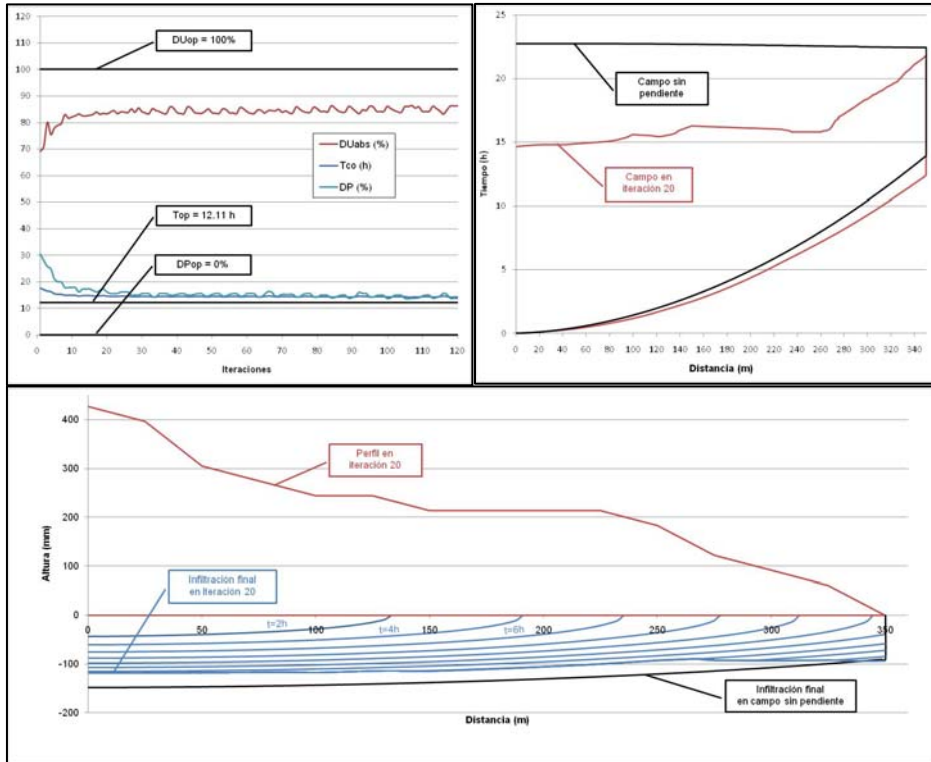


Figura 5. Caso 4: evolución de indicadores, diagrama de avance-receso y perfiles.

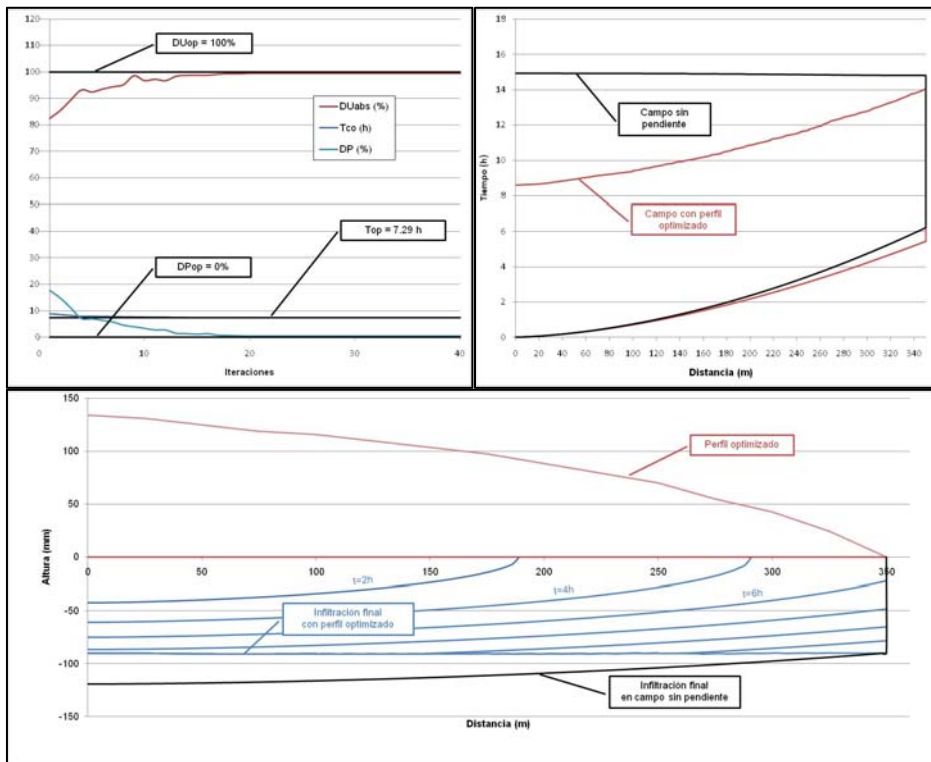


Figura 6. Caso 5: evolución de indicadores, diagrama de avance-receso y perfiles.

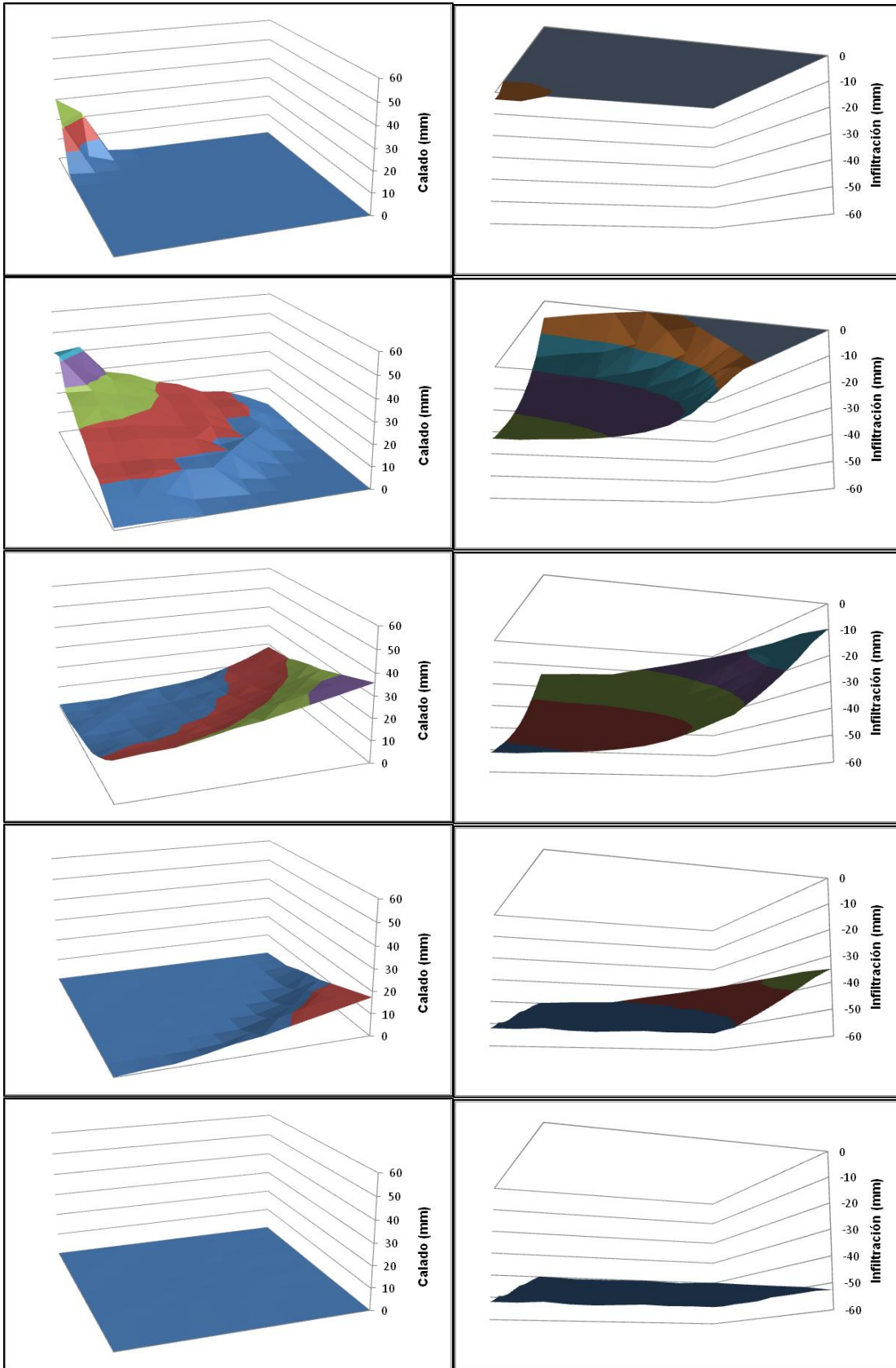


Figura 7. Caso 6: evolución del calado y de la infiltración para $t=1\text{min}$, $t=63.2\text{min}$, $t=126.1\text{min}$, $t=189.0\text{min}$ y $t=252.5\text{min}$.

Caso 6: Tablar bidimensional, final cerrado.

Por último, se presenta un caso bidimensional, resuelto con la ayuda del programa B2D. La metodología *chinachana* nuevamente consigue eliminar prácticamente la percolación profunda y elevar la DU hasta el 100% (primer gráfico de la figura 7). La forma del suelo evoluciona hasta la que se muestra en el segundo gráfico de la figura 8.

La figura 7 muestra la representación tridimensional de la evolución del calado (primera columna) y de la infiltración (segunda columna) a lo largo y ancho del campo en cinco instantes diferentes igualmente distanciados: inicial, cuarta parte del tiempo total, mitad del tiempo total, tres cuartas partes del tiempo total y final. Se observa una vez más una infiltración homogénea debida a la forma del campo.

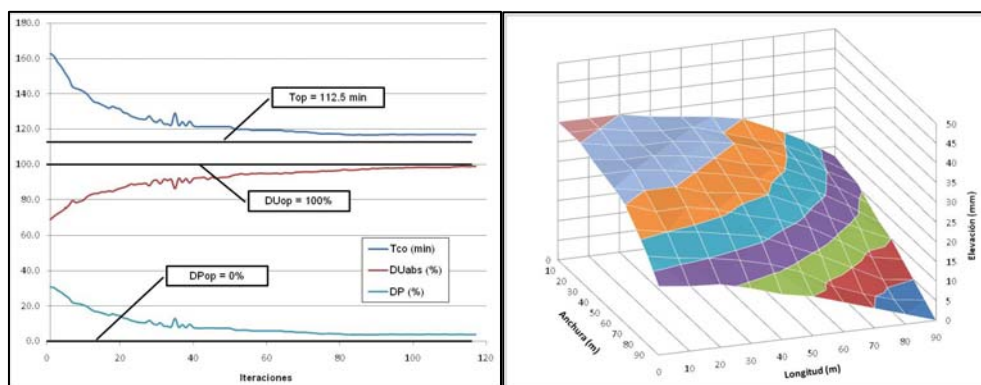


Figura 8. Caso 6: evolución de indicadores y forma del campo optimizado.

Resumen de resultados.

La Tabla 3 recoge algunos resultados adicionales para cada uno de los casos: la pendiente promedio del perfil optimizado del suelo (hay que tener en cuenta que la pendiente máxima del campo será mayor), el calado máximo a lo largo del riego (con indicación de si se produce en el extremo aguas arriba o aguas abajo), el tiempo necesario para que se infiltre la altura requerida (t_{req}), el caudal límite (según las expresiones (7) y (8)), y finalmente el caudal real de riego (nótese que únicamente es menor que el caudal límite en el caso 4).

Tabla 3. Casos de estudio. Resultados I.

Caso	Pendiente promedio	Calado máximo (mm)	t_{req} (min)	Caudal límite	Caudal real
1	$2.15 \cdot 10^{-4}$	154 (a arriba)	99.7	3.11 l/s/m	10.93 l/s/m
2	$5.77 \cdot 10^{-4}$	76.5 (a arriba)	125.4	1.23 l/s/m	2.32 l/s/m
3	$1.95 \cdot 10^{-3}$	61.0 (a arriba)	125.4	1.23 l/s/m	2.32 l/s/m
4	$1.22 \cdot 10^{-3}$	149 (a abajo)	536.4	0.989 l/s/surco	0.714 l/s/surco
5	$3.83 \cdot 10^{-4}$	147 (a abajo)	536.4	0.989 l/s/surco	1.2 l/s/surco
6	$2.74 \cdot 10^{-4}$	44.1 (a arriba)	121.0	55.8 l/s	60 l/s

Por otro lado, en la Tabla 4 se informa, también para cada uno de los casos estudiados, de cómo se modifican DU , DP , el tiempo de riego y el volumen de agua de riego entre las situaciones inicial (campo sin pendiente) y final (campo con forma optimizada). Con respecto a esta tabla, conviene señalar que en el caso 3 la escorrentía superficial aumenta de 7.9% a 30% y que en los casos 4 y 5 el volumen de agua se expresa por surco.

Tabla 4. Casos de estudio. Resultados II.

Caso	Uniformidad distribuc. (%)		Percolación profunda (%)		Tiempo de riego (min)		Volumen de agua (m ³)		Ahorro de agua y de tiempo
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	
1	85.3	99.4	14.7	0.6	33.50	29.10	1138	989	13.1 %
2	66.6	96.7	33.5	4.0	100.8	69.6	1712	1182	31.0 %
3	61.9	94.9	35.3	2.1	118.2	98.4	2008	1672	16.7 %
4	69.3	84.1	30.5	15.5	1057	870.0	45.01	37.06	17.7 %
5	82.4	99.4	17.7	0.5	531.0	439.8	38.23	31.67	17.2 %
6	69.2	98.9	30.7	3.8	163.0	117.0	586.8	421.2	28.2 %

La última columna de la tabla ilustra el ahorro, siempre teórico, de agua y de tiempo de riego que se alcanza en cada uno de los casos, debido básicamente a la disminución o eliminación de la percolación profunda.

4.- Discusión

El presente trabajo es eminentemente teórico. Para su posible aplicación, es necesario hacer una serie de consideraciones prácticas:

- Se ha supuesto una homogeneidad absoluta de la infiltración en todo el campo y se ha desestimado la importancia de la microtopografía en el comportamiento del riego (Playán et al., 1996). No cabe duda de que la infiltración resulta ser más heterogénea en la práctica que en la teoría.
- En muchos casos, el caudal de riego puede ser variable durante un evento de riego superficial.
- El coeficiente de Manning es difícil de estimar, y puede variar de unas partes del campo a otras. Además, también puede variar a lo largo de una campaña de riego, por variaciones en la estructura superficial del suelo o por la resistencia del propio cultivo al avance del agua.
- El perfil óptimo se calcula para una dosis de riego determinada, pero esta puede variar a lo largo de una campaña de riego, en función de las necesidades del cultivo y del suelo. Por ello, el perfil debería calcularse para la dosis más frecuente, y cuando se deban aplicar dosis diferentes, se regaría de forma más ineficiente.
- Resulta técnicamente más complejo dotar a un campo de una forma curva que de una forma plana (con o sin pendiente). Por ello, la forma óptima que se obtiene podría ser usada simplemente para decidir la pendiente única o el conjunto de pendientes del campo.
- La nivelación y el movimiento de tierras asociado tiene un coste económico que no se ha considerado. Tal coste puede superar el coste del tiempo y del agua ahorrada, haciendo inviable económicamente la optimización presentada. Únicamente en los casos en que el agua es un factor limitante por su escasez o su precio, podría ser rentable acometer la conformación del perfil de un campo de acuerdo al perfil óptimo.
- El movimiento de tierras excesivo puede eliminar la capa fértil del suelo, por lo que es importante evaluar el impacto del movimiento de tierras en dicha capa.

Por otro lado, la metodología *chinachana* se ha aplicado en todos los casos estudiados partiendo de un campo sin pendiente, nivelado a cero. Si el punto de partida hubiera sido un campo con una pendiente apropiada, el número de iteraciones del método hubiera sido menor, y los resultados hubieran sido más cercanos a la situación inicial.

5.- Conclusiones y Recomendaciones

Desde un punto de vista estrictamente teórico, la principal conclusión es que el método *chinachana* consigue un riego superficial uniforme optimizando la forma del campo, siempre que el caudal de riego sea superior al caudal límite. En el caso de final abierto, el método consigue eliminar la percolación profunda, pero a costa de aumentar la escorrentía superficial, lo cual puede ser interesante en determinados casos, como se ha señalado anteriormente.

A la vista de las consideraciones expuestas en el apartado de discusión, se puede concluir que los resultados pueden ser útiles cuando la disponibilidad de agua es un factor limitante, porque podría lograrse un ahorro, quizá sustancial, de agua en tales casos a través de la conformación cuidadosa de la topografía de los campos de riego. En otros casos, los resultados pueden servir de guía para decidir una pendiente apropiada para el campo, o un conjunto de dos o tres pendientes que acerquen la forma del campo a su forma óptima.

Agradecimientos

Al Dr. Enrique Playán Jubilar y a la Dra. Pilar García Navarro por su amable disposición para atender consultas relacionadas con este trabajo.

Referencias

- Bautista, E., Clemmens, A.J., Strelkoff, T.S., Niblack, M. 2009a. Modern analysis of surface irrigation systems with WinSRFR. *Agricultural Water Management* 96(7), 1146-1154
- Bautista, E., Clemmens, A.J., Strelkoff, T.S., Niblack, M. 2009b. Analysis of surface irrigation systems with WinSRFR-Example application. *Agricultural Water Management* 96(7), 1162-1169
- Dholakia, M., Misra R., Zaman, M.S. 1998. Simulation of border irrigation system using explicit MacCormack finite difference method. *Agricultural Water Management* 36, 181-200.
- FAO. 2002. *Irrigation manual – planning, development, monitoring and evaluation of irrigated agriculture with farmer participation*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Harare, Zimbabwe.
- García-Navarro, P., Alcrudo, F. Savirón, J.M. 1992. 1-D Open-channel flow simulation using TVD-McCormack scheme. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(10) 1359-1372.
- Kostiakov, A.N. 1932 On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. *Trans. Sixth Comm. Intl. Soil Sci. Soc.*, Russian Part A:17-21.
- Playán E., Walker, W.R., Merkley, G.P. 1994a. Two-dimensional simulation of basin irrigation. I: Theory. *Journal of Irrig. and Drainage Engineer.* 120(5) 837-856.
- Playán E., Walker, W.R., Merkley, G.P. 1994b. Two-dimensional simulation of basin irrigation. II: Applications. *Journal of Irrig and Drainage Engineer.* 120(5) 857-870.
- Playán, E., Faci, J. M., and Serreta, A. 1996. Characterizing microtopographical effects on level-basin irrigation performance. *Agricultural Water Management* 29, 129-145.
- Walker, W. R. y Skogerboe, G. V. 1987. *Surface irrigation. Theory and practice*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., EE.UU.