

Estudio hidrodinámico de la influencia de la pendiente del suelo en el riego superficial

INTRODUCCIÓN

Usualmente, el principal concepto de pérdida de agua en el riego superficial en parcela es la percolación profunda (el agua que se infiltra en la tierra más allá del alcance efectivo de las raíces del cultivo). El riego superficial lleva aparejado una falta de uniformidad intrínseca debida al hecho de que en las zonas más próximas al punto de alimentación existe un mayor tiempo de oportunidad para la infiltración del agua. En cualquier variante de riego superficial (inundación, tablar o surco, con o sin escorrentía final) la falta de uniformidad de la infiltración del agua conduce a rendimientos de aplicación típicos inferiores a los que se pueden conseguir con técnicas de riego a presión (aspersión, goteo), pues resulta inevitable la pérdida de agua por percolación profunda si se quiere alcanzar la dosis de riego necesaria en todo el campo.

Existe un acuerdo generalizado de que la eficiencia de aplicación y la uniformidad de distribución del riego superficial son menores que las del riego a presión, aunque en determinadas situaciones los valores puedan llegar a ser equiparables. Los estudios encaminados a la mejora de la eficiencia del riego superficial a nivel de parcela suelen ir ligados al análisis del tiempo de corte del riego, de su frecuencia, del caudal de entrada (con técnicas de riego con caudal variable y a pulsos) y de las dimensiones del campo o surco (longitud y anchura), dando lugar a recomendaciones prácticas para el diseño y el manejo del riego superficial (FAO, 2002).

De este modo, los valores típicos de eficiencia de aplicación E_a en el riego superficial se situarían en valores comprendidos entre el 50% y el 80% a nivel de parcela, según los casos, tal como se puede observar en la

Resumen / Abstract

Del análisis hidrodinámico del riego superficial se aborda la influencia de la pendiente longitudinal del campo sobre la uniformidad del riego. Se aplica el análisis dimensional considerando la pendiente longitudinal del campo como una variable adicional de la que también depende la uniformidad del riego junto con otros parámetros. Mediante simulación del riego superficial unidimensional se desarrollan gráficos adimensionales que relacionan las variables del problema. Tales gráficos suponen una generalización de otros anteriores y resultan útiles en la práctica para determinar la pendiente del campo, el caudal de riego o la longitud y anchura del campo, en relación con la uniformidad del riego, y conseguir así importantes ahorros de agua en la agricultura de regadío.

Palabras clave: riego superficial, pendiente del suelo, uniformidad de riego.

From hydrodynamic analysis of surface irrigation the influence of the field longitudinal slope over irrigation uniformity is addressed. Dimensional analysis is applied considering the field longitudinal slope as an additional variable influencing irrigation uniformity along with other parameters. By means of one-dimensional surface irrigation simulation non-dimensional graphs are developed relating problem variables. Those graphs become a generalization of previous ones in the literature and are useful in practice to determine field slope, irrigation flow, field length and field width as related to irrigation uniformity with important water savings in irrigation agriculture.

Keywords: surface irrigation, soil slope, irrigation uniformity.

Tabla 1, extraída de (De Paco, 1992) con datos del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (SCS) y de la Comisión Internacional de Riegos y Drenajes (ICID).

Tabla 1. Eficiencias de aplicación en el riego por superficie

Método de riego	E_a (SCS)	E_a (ICID)
Inundación	60-80%	56-59%
Tablares	60-75%	47-57%
Surcos	50-70%	54-58%

La eficiencia de aplicación E_a , definida como el cociente entre la cantidad de agua de riego que se aprovecha dividida entre la cantidad de agua aplicada, coincide con la uniformidad de distribución DU cuando el campo a regar no tiene escorrentía final y la infiltración mínima coincide con la infiltración requerida.

La necesidad creciente de ahorro de agua y las modernas técnicas de nivelación de terrenos con o sin pendiente (por láser o por GPS) justifican el estudio en profundidad de la influencia que tiene la pendiente del campo a regar sobre los parámetros de rendimiento de aplicación del agua y de uniformidad de la distribución. Las actuales herramientas informáticas de simulación de la hidrodinámica unidimensional del riego superficial permiten un estudio detallado de la influencia de la pendiente sobre los parámetros de eficiencia, lo cual se convierte en el objetivo de este estudio, tratando de establecer generalizaciones que puedan resultar de utilidad en el diseño y la práctica del riego superficial con el fin de ahorrar agua.

A modo de ejemplo, la figura 1 muestra la manera en que la pendiente longitudinal de un tablar regado por inundación influye sobre la uniformidad de la distribución (DU) para un caso concreto.

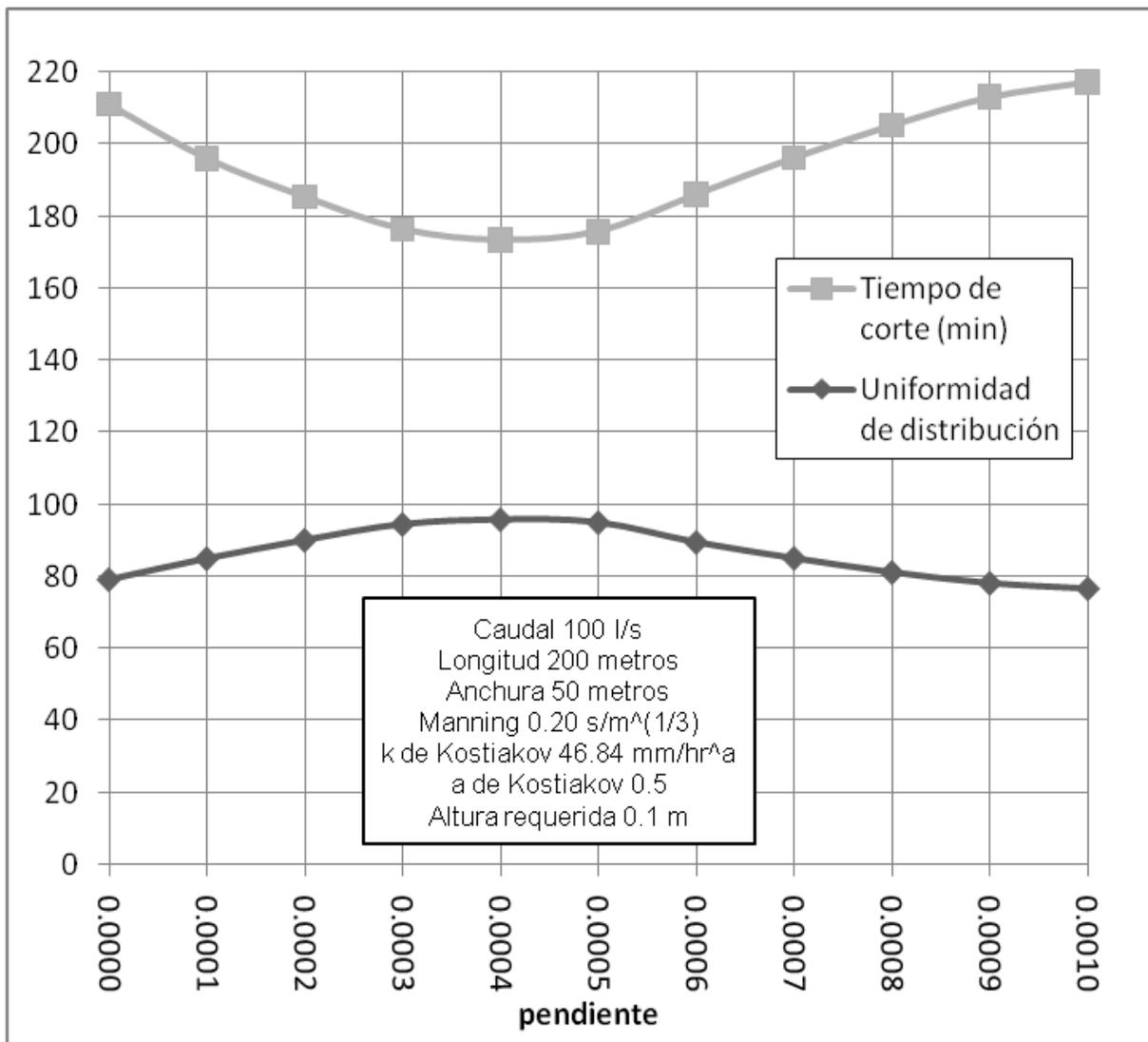


Figura 1. Influencia de la pendiente longitudinal sobre el tiempo de corte y sobre la uniformidad de distribución.

La figura ha sido obtenida mediante la simulación sucesiva de escenarios con el programa informático WinSRFR, desarrollado por el Arid-Land Agricultural Research Center del Departamento de Agricultura de EE.UU., y se ofrece como muestra de la influencia objeto de estudio. En ella se observa que con el campo nivelado sin pendiente se tiene una DU del 79.3% pero dotando al campo de una ligera pendiente del 4 por 10000 se conseguiría una DU del 95.9%. En términos de ahorro de agua, se pasaría de un volumen de 1266.0 m³ de agua necesaria para regar a un volumen de 1040.4 m³, lo que supondría un 21.68% de ahorro sobre el total del agua de riego (en volumen, 225.6 m³ de ahorro de agua en cada riego). Este menor consumo de agua no tendría repercusión sobre el cultivo, pues el agua ahorrada es la que se pierde en percolación profunda.

El menor gasto de agua se ve reflejado también en el tiempo de corte del riego, tal como se observa en la figura. El tiempo de corte se toma como el tiempo necesario para satisfacer la dosis requerida de agua en todo el campo. Con el campo nivelado sin pendiente, el tiempo de corte es de 211 minutos, pero con la pendiente de 0.0004 se sitúa en 173.4 minutos. Por tanto, el tiempo de riego se ve reducido en 37.6 minutos, lo que representa un 17.82% de disminución del tiempo de riego.

MATERIALES Y MÉTODOS

Clemmens et al. (1981) aplicaron la técnica del análisis dimensional (Bridgman, 1922) al problema hidrodinámico del riego de un tablar sin pendiente y con final cerrado para analizar la dependencia de la uniformidad de distribución con respecto al resto de parámetros relevantes.

$$DU = \Psi(k, a, n, t_{co}, q_{in}, L) \quad (1)$$

En la expresión (1), DU es la uniformidad de distribución, definida como la infiltración mínima en el campo z_n dividida por la infiltración promedio z_g ; k y a son los parámetros de la función de infiltración de Kostiaikov, que relaciona la altura de infiltración z con el tiempo de oportunidad τ según la expresión (2); n es el coeficiente de rugosidad de Manning; t_{co} es el tiempo de corte del riego; q_{in} es el caudal de riego por unidad de anchura del campo o caudal unitario, definido como el caudal de riego q dividido por la anchura del campo b; y L es la longitud del campo.

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

El tiempo de riego t_{co} se supone que es el estrictamente necesario para que todo el campo reciba la dosis de riego o altura de agua requerida z_g , de manera que se cumple que $z_n = z_g$.

Aplicando el teorema $\text{\textcircled{D}}$ de Buckingham (Buckingham, 1914) del análisis dimensional a la expresión (1), se llega a

$$DU = f(a, q_{in}^*, L^*) \quad (3)$$

Siendo:

$$q_{in}^* = \frac{q_{in}}{Q} \quad (4)$$

$$L^* = \frac{L}{X} \quad (5)$$

$$Q = X \cdot z_n \cdot \tau_n^{-1} \quad (6)$$

$$X = \tau_n^{2/3} \cdot z_n^{7/9} \cdot \left(\frac{n}{C_u} \right)^{-2/3} \quad (7)$$

En (6) y en (7), τ_n es el tiempo de oportunidad necesario para que el agua se infiltre una altura $z_n = z_g$, y C_u es un coeficiente de unidades que en el sistema internacional vale 1.0 m^{1/2}/s. Nótese en la expresión (3) que las variables DU y a no han sido adimensionalizadas porque ya son adimensionales. Clemmens y Detrick (1982) tomaron ocho valores diferentes de a (0.1, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 y 1.0) y para cada uno de ellos dibujaron un gráfico que representa la relación funcional

$$DU = f(q_{in}^*, L^*) \quad (8)$$

Para ello se sirvieron de un modelo informático de simulación de la hidrodinámica unidimensional del riego superficial con el que ejecutaron un número suficiente de escenarios diferentes, resolviendo para cada uno de ellos las ecuaciones de Saint Venant (conservación de la masa y conservación de la cantidad de movimiento) con el método de diferencias finitas en el modelo de cero inercia.

El aspecto de los gráficos de Clemmens y Detrick se muestra en la figura 2.

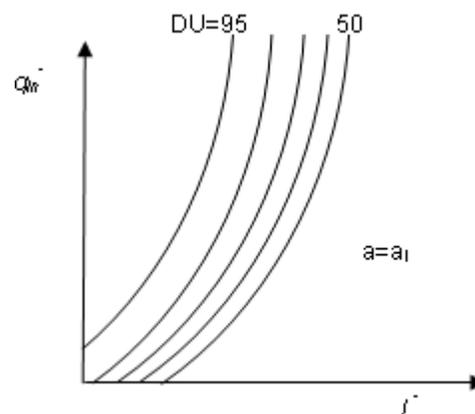


Figura 2. Aspecto de los gráficos de (Clemmens y Detrick, 1982).

Los gráficos de Clemmens y Dedrick tuvieron gran aceptación práctica y todavía hoy sirven de referencia en el diseño de sistemas de riego de tablares nivelados sin pendiente ni escorrentía final. Los gráficos relacionan la terna (q_{in}^* , L^* , DU) de manera que fijando dos números adimensionales, es posible obtener el tercero. En la práctica, esto permite determinar apropiadamente el caudal de riego, la longitud del campo o su anchura, situando la uniformidad de distribución en valores razonables.

El desarrollo anterior parte de la premisa de que el campo se encuentra nivelado sin pendiente, es decir, que la pendiente longitudinal S es igual a cero. Tal como se ha visto en el apartado anterior, en ocasiones puede resultar interesante dotar al campo de una cierta pendiente para mejorar la uniformidad de distribución. Para estudiar tal caso desde la perspectiva del análisis dimensional, la pendiente S intervendría como una nueva variable independiente.

$$DU = \Psi(k, a, n, t_{co}, q_{in}, L, S) \quad (9)$$

La aplicación del teorema \mathcal{D} de Buckingham en este caso conduciría a

$$DU = f(a, q_{in}^*, L^*, S) \quad (10)$$

Al igual que ocurría con las variables DU y a, la pendiente longitudinal S es adimensional por lo que se mantiene tal cual en la relación de variables adimensionales de la expresión (10). Esta expresión se puede entender como una generalización del análisis de Clemmens y Dedrick(1982) en la que se considera cualquier valor de pendiente longitudinal del campo. En este nuevo planteamiento, el caso particular $S=0$ sería equivalente al desarrollo de Clemens y Dedrick (1982), correspondiéndose entonces la expresión (10) con la expresión (3).

Para la representación gráfica de la expresión (3), Clemmens y Dedrick (1982) optaron por dar valores diversos al parámetro a, partiendo de la base de que solamente es posible representar gráficamente funciones que dependen de dos variables, ya sea mediante isolíneas (como hicieron Clemmens y Dedrick) o mediante gráficos tridimensionales. La representación gráfica de (10) resul-

ta algo más complicada porque interviene una variable adicional. Esto conduce a que es necesario fijar un conjunto de valores concretos para dos números adimensionales, no sólo para uno como en el caso anterior, de manera que el número total de gráficos se vería incrementado en un orden de magnitud.

Por ejemplo, en la expresión (10) es posible fijar un conjunto de valores concretos para a y para L^* . De este modo, se consiguen gráficos que representan la relación funcional existente entre la uniformidad de distribución, la pendiente del campo y el caudal unitario.

$$DU = f(S, q_{in}^*) \quad (11)$$

Estos gráficos permitirían, por ejemplo, establecer la mejor pendiente del campo para unas condiciones dadas de caudal, o establecer el mejor caudal para una pendiente dada.

RESULTADOS

Para el parámetro a se pueden tomar los mismos valores que tomaron (Clemmens y Dedrick, 1982) y para L^* se puede tomar un conjunto de 8 valores que abarquen todo el intervalo de posibilidades que son consideran en los gráficos de (Clemmens y Dedrick, 1983).

$$a_i \in \{0.1, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 1.0\} \quad \forall i = 1..8 \quad (12)$$

$$L_i^* \in \{0.1, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 2.0, 3.0\} \quad \forall i = 1..8 \quad (13)$$

De esta manera, es necesario configurar un total de $8 \times 8 = 64$ gráficos diferentes. Cada uno de los gráficos ha de contener un número suficientemente elevado de simulaciones que cubra todo el plano formado por las variables S y q_{in}^* . Con la actual capacidad computacional, es viable automatizar el proceso de obtención de los gráficos, o bien recurrir a herramientas informáticas ya existentes para su creación.

A modo de ejemplo, se muestra el gráfico de uniformidad de distribución (expresada en porcentaje) que se obtiene para $a=0.5$ y $L^*=0.6$. La figura 3 muestra las isolíneas proyectadas sobre el plano de referencia correspondiente a $DU=55\%$ y la figura 4 muestra el mismo gráfico en forma tridimensional.

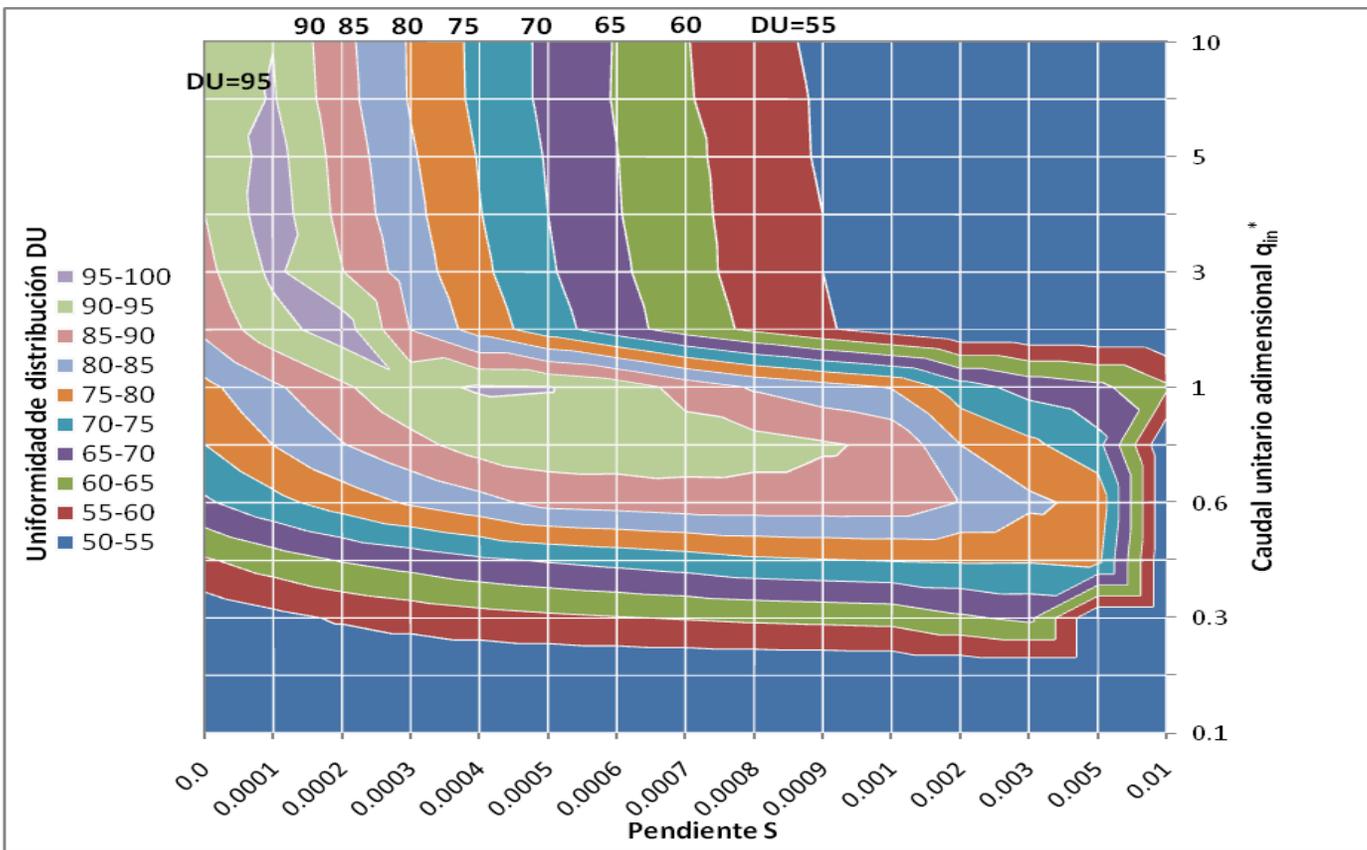


Figura 3. Uniformidad de distribución para $a=0.5$ y $L^*=0.6$. Isolíneas.

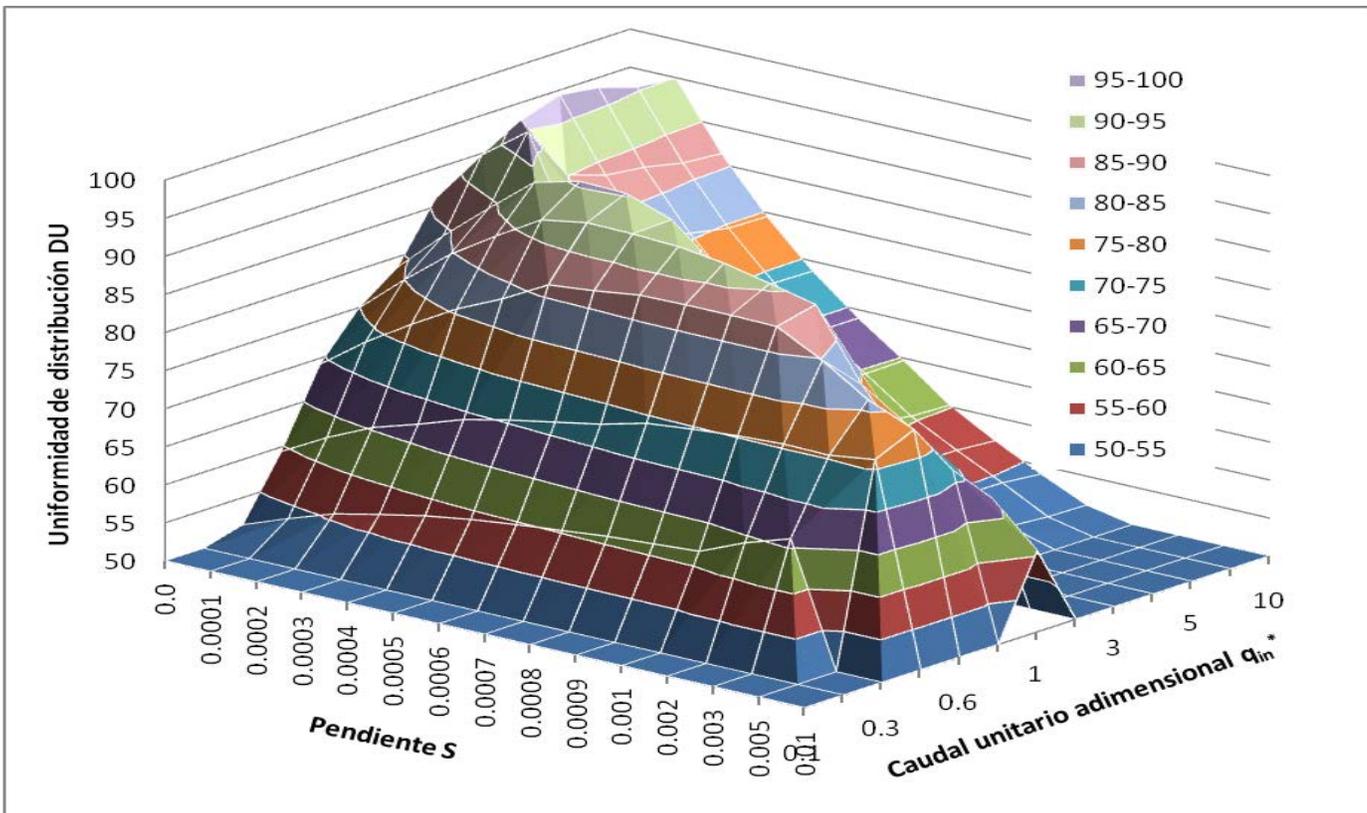


Figura 4. Uniformidad de distribución para $a=0.5$ y $L^*=0.6$. Gráfico tridimensional.

Para la obtención de los gráficos que se muestran, se han simulado un total de 162 escenarios diferentes con la herramienta informática WinSRFR, ajustando los tiempos de corte de manera que la infiltración mínima z_n es igual a la infiltración requerida z_d .

La uniformidad de distribución representada en las figuras 3 y 4 presenta una forma de «cordillera» curvada y decreciente, que partiría asintóticamente de un valor de $DU=100\%$ correspondiente a $S=0$ y $q_{in}^* \rightarrow \infty$ (se trataría de una hipotética aplicación instantánea en el campo de todo el volumen de agua necesario, obviamente sin tener en cuenta fenómenos de erosión del terreno). Manteniendo $S=0$, a medida que el caudal disminuye, la uniformidad de distribución también disminuye, pues los tiempos de oportunidad al comienzo de la parcela son mayores resultando un riego menos homogéneo. Es lo que se puede observar también en los gráficos de Clemmens y Dedrick (1982), cuyos valores coinciden con bastante exactitud con los que se observan en las figuras 3 y 4 para $S=0$.

Para un caudal determinado, se observa que la uniformidad de distribución aumenta inicialmente conforme aumenta la pendiente y después cambia la tendencia y comienza a decrecer, teniéndose un valor óptimo de pendiente. Es precisamente lo que se observaba en la figura 1, que resulta ser un corte en $q_{in}^*=1$ de las figuras 3 y 4. Fijando la pendiente, se observa también que la uniformidad de distribución primero crece y luego decrece a medida que aumenta el caudal unitario, existiendo también un valor óptimo de caudal unitario que maximiza la uniformidad de distribución para una pendiente dada.

La «cordillera» que forma la uniformidad de distribución decrece hasta valores hipotéticos de $DU \rightarrow 0$ cuando $q_{in}^* \rightarrow 0$. La «cresta» tiene cada vez menor «altitud» (conforme aumenta la pendiente del campo, la máxima uniformidad de distribución alcanzable es menor), hasta un valor asintótico de $DU \rightarrow 0$ cuando $S \rightarrow \infty$.

El análisis presentado permite la toma de decisiones tanto en el diseño de sistemas de riego superficial, como en la determinación de la mejor pendiente del campo, la longitud adecuada o el caudal unitario de riego (y por tanto, la anchura del campo), en el caso general de un campo con una pendiente arbitraria (el caso de un campo sin pendiente sería un caso particular que también quedaría contemplado). Por ejemplo:

1. Determinación de la mejor pendiente del campo. Conocidos los parámetros k y a de la función de infiltración de Kostiakov (mediante ensayos de campo o mediante tablas en función del tipo de suelo), el coeficiente n de Manning (mediante tablas en función del suelo y el cultivo), el tiempo de oportunidad τ_n (a partir de la dosis de

riego z_d y de la función de infiltración), el caudal unitario q_{in} (dividiendo el caudal de riego por la anchura del campo) y la longitud L del campo, se calculan q_{in}^* y L^* a partir de (4) y (5). Se escoge el gráfico que mejor se corresponda con L^* y a , se entra en él con q_{in}^* y se observa qué pendiente ofrece una mejor uniformidad de distribución.

2. Determinación de la mejor longitud del campo. Conocidos k , a , n , τ_n , q_{in} y S , se calcula q_{in}^* , se seleccionan los gráficos correspondientes al valor de a y en cada uno de ellos se entra con q_{in}^* y S para obtener DU . Se toma L^* del gráfico que ha ofrecido un mejor valor de DU y con (5) se calcula L .

3. Determinación del mejor caudal de riego. Conocidos k , a , n , τ_n , L , S y b , se calcula L^* y se escoge el gráfico correspondiente a L^* y a . En él, se entra con S y se toma el valor de q_{in}^* que ofrece una mayor DU . Con la expresión (4) se calcula el valor de q_{in} y multiplicando por la anchura del campo b se obtiene el caudal de riego $q=b \cdot q_{in}$.

4. Determinación de la mejor anchura del campo. Conocidos k , a , n , τ_n , L , S y q . Se procede igual que en el apartado anterior, y una vez obtenido q_{in} se calcula la anchura del campo b mediante $b=q/q_{in}$.

5. Determinación conjunta de dos o más variables de decisión. Mediante los gráficos se pueden estudiar diversas combinaciones de soluciones cuando existen dos o más variables de decisión (por ejemplo, la longitud y la anchura, o la pendiente y la anchura) mediante el análisis de un conjunto definido de posibilidades.

CONCLUSIONES

- Se ha aplicado el análisis dimensional al caso del riego superficial de un campo sin escorrentía final considerando la pendiente longitudinal como una variable independiente.

- Partiendo del desarrollo de (Clemmens y Dedrick, 1982), se ha incluido la pendiente en el análisis y se ha llegado a una relación funcional que la vincula con la uniformidad de la distribución, el exponente de la función de infiltración de Kostiakov, la longitud adimensional y el caudal unitario adimensional.

- Se ha definido una representación gráfica de la relación funcional alcanzada, consistente en fijar el exponente de la función de infiltración de Kostiakov y la longitud adimensional asignándoles un conjunto concreto de valores. De este modo, se posibilita la representación gráfica de la uniformidad de distribución frente a la pendiente longitudinal y el caudal unitario adimensional.

- A modo de ejemplo, se ha mostrado la representación gráfica resultante de fijar el exponente de Kostiaikov en 0.5 y la longitud adimensional en 0.6. La representación gráfica se ha mostrado mediante isolíneas y mediante una vista tridimensional.

- Se ha indicado la aplicación práctica del desarrollo propuesto en la determinación de pendientes, longitudes, caudales y anchuras de los campos de riego.

■ REFERENCIAS

- **Buckingham, E. (1914).** On physically similar systems; illustrations of the use of dimensional equations. *Phys. Rev.* 4: 345–376.
- **Bridgman, P. W. (1922).** *Dimensional Analysis*. Yale University Press.
- **Clemmens, A. J., Strelkoff, T., Dedrick, A. R. (1981).** Development of solutions for level-basin design. *Journal of Irrigation and Drainage Division, ASCE* 107(3).
- **Clemmens, A. J., Dedrick A. R. (1982).** Limits for practical level-basin design. *Journal of Irrigation and Drainage Division, ASCE* 108 (2).
- **De Paco, J.L. (1992).** *Fundamentos del cálculo hidráulico en los sistemas de riego y drenaje*. IRYDA, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Ediciones Mundi Prensa. ISBN 84-7114-423-9.
- **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.