

DISEÑO Y REVISIÓN DE SURCOS CON RIEGOS CONTINUO Y DE CORTE POSTERIOR

Ernesto Vázquez

Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México

RESUMEN: Se presentan ecuaciones de regresión lineal múltiple para determinar longitudes de diseño y eficiencias de aplicación en surcos con riego continuo (gasto constante) y con corte posterior o recorte (gasto inicial reducido a la mitad después de la etapa de avance del agua). Los gastos de alimentación en ambos métodos de riego se encuentran en función de la pendiente del surco. La comparación de las longitudes diseñadas con las recomendadas en la práctica es aceptable, por lo que se concluye que las ecuaciones pueden usarse dentro de los intervalos empleados en la simulación numérica, con la ventaja de conocerse, en forma aproximada, los tiempos de riego y el ahorro de agua por aplicar el método de corte posterior. Para la revisión de surcos con longitud diferente a la requerida en condiciones óptimas, que fueron las empleadas para generar las ecuaciones de regresión, se presentan gráficas adimensionales donde es posible determinar la eficiencia y, con ella, los tiempos de riego en las condiciones reales del surco. Por último, a partir del parámetro adimensional óptimo de las gráficas se pueden diseñar surcos para cualquier longitud.

INTRODUCCIÓN

El objetivo del diseño de surcos es lograr la máxima eficiencia de aplicación. Si la longitud del surco se conoce, existe un gasto óptimo, y si el gasto es dato hay una longitud óptima, es obvio que a mayor longitud de surco se requiere mayor gasto. Los agricultores franceses recomiendan gastos de 0.3 a 0.5 l/s por cada 100 m de longitud de surco (Cemagref et Groupe France Agricol, 1990). Este concepto de linealidad, sin que se cumpla la relación en todos los casos, es el que se aprovecha en este trabajo para diseñar surcos. Por tanto, si se parte de un gasto que no produzca erosión, calculado en función de la pendiente, es posible determinar una longitud óptima que sirva como referencia en el diseño de otros surcos con idénticas características pero diferente longitud y gasto.

Las demás variables que intervienen en el diseño de surcos, empleadas en este trabajo como independientes, son el coeficiente de rugosidad, la separación entre surcos, la pendiente del surco, la dosis, la conductividad hidráulica, la humedad inicial del suelo y la diferencia de tensiones y humedades del suelo. Estas cuatro últimas variables son parámetros de la fórmula de Green y Ampt, utilizada en el modelo numérico (Vázquez, 1994) para calcular la lámina acumulada de infiltración.

Con resultados de simulaciones numéricas se obtienen ecuaciones de regresión lineal múltiple, donde las variables dependientes son la longitud óptima de referencia y las eficiencias máximas, y con resultados para otras longitudes y gastos se calculan eficiencias menores a la máxima que permiten construir gráficas para la revisión de surcos.

Artículo recibido el **14 de septiembre de 1995** y aceptado para su publicación el **8 de febrero de 1996**. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo. En el caso de ser aceptadas, las discusiones serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores en el primer número de la revista que aparezca una vez transcurrido el plazo indicado.

ANTECEDENTES

El diseño de surcos para riego con gasto constante (riego continuo) ha sido presentado con diferentes criterios. Booher (1974) recomienda longitudes en tablas, donde la selección se hace de acuerdo al tipo de suelo, pendiente y dosis por aplicar. Walker y Skoger-boe (1987) emplean fórmulas empíricas y proponen un procedimiento para determinar el gasto óptimo en surcos con una longitud fija, Jensen (1980) presenta un método gráfico para aplicar el método de corte posterior. En los últimos años, gracias al avance en la solución numérica con computadoras digitales, se han presentado modelos matemáticos que resuelven las ecuaciones de Saint-Venant. Entre los más recientes, García (1991), Schmitz y Seus (1992), Bautista y Wallender (1992), y Sánchez y Fuentes (1992). Existen intentos, en riego continuo, como el de Juana y Losada (1994), por sustituir el empleo de los modelos matemáticos a través de gráficas construidas con resultados de los mismos modelos matemáticos. En este trabajo se presentan ecuaciones de regresión lineal múltiple, útiles para riego continuo y de corte posterior, obtenidas con los resultados de un modelo matemático completo en diferencias finitas que usa la ecuación de Creen y Ampt para calcular el gasto de infiltración (Vázquez, 1994). El objetivo es proporcionar una alternativa al modelo matemático en el diseño y revisión de surcos. Para ello se emplearon datos geométricos de surcos parabólicos reportados por Bautista y Wallender (1993a), así como surcos triangulares con ángulos de 112 y 120 grados en el vértice. Este último, con longitud de 52.5 m, construido en las instalaciones del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, se utilizó para calibrar el modelo matemático (Vázquez, 1996).

VARIABLES

Las variables principales que intervienen en el proceso de riego por surcos son la separación entre surcos (D), la longitud (L), el gasto (Q), la pendiente (S), la conductividad hidráulica (K), el coeficiente de rugosidad de Manning (n), la dosis (Z), la humedad inicial del suelo (w) y el producto de las diferencias de tensiones y humedades del suelo (h).

El gasto de infiltración en un surco se puede calcular con la fórmula de Green y Ampt (Chu, 1978)

$$q = PK(1 + \frac{TH}{Za}) \tag{1}$$

Se simplifica el número de variables cuando en la ecuación 1 se usa el producto de la diferencia en tensión capilar antes y después del humedecimiento del suelo (T), por la diferencia de humedad del suelo antes y después de humedecerse (H), esto es, h = TH; y si el

gasto inicial del método de corte posterior Qc (en l/s), que no produce erosión en el surco se expresa, como lo recomienda el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Cuenca, 1989), en función de la pendiente S (en %)

$$Qc = \frac{0.6}{S} \tag{2}$$

ECUACIONES DE REGRESIÓN Y GRÁFICAS PARA REVISIÓN

Con las simplificaciones de las variables anteriores, el diseño se reduce a determinar la longitud óptima (Lp) en función de las variables independientes S, K, n, w, h, Z y D.

a) Riego continuo

Con los resultados del modelo matemático aplicado a 189 surcos, donde las siete muestras de los datos para cada variable independiente siguen la distribución de probabilidad normal, dentro de los intervalos S(0.2 a 0.6 %), K(0.0133 a 0.0833 cm/min), n(0.03 a 0.06), w(1 a 3 cm), h(3 a 15 cm), Z(5 a 15 cm) y D(65 a 100 cm), se obtiene que la longitud óptima, es decir, aquella longitud que produce la máxima eficiencia con el gasto dado por la ecuación 2, es:

$$Lp = 4.85S^{-0.52} K^{-0.91} n^{-0.29} w^{0.12} h^{-0.36} Z^{0.28} D^{-0.08} \tag{3}$$

donde Lp está en m, S en %, K en cm/min, n en s/m^{1/3}, y w, h, Z y D en cm.

El coeficiente de correlación, obtenido con una regresión simple entre las longitudes calculadas con la ecuación 3 y los resultados del modelo matemático, es de 0.84. Este valor, aunque bajo, se considera aceptable para una regresión con tantas variables. La ecuación se probó en múltiples ensayos con el modelo matemático, además de los 189 surcos originales, obteniéndose eficiencias muy próximas a las máximas.

De acuerdo con el valor de los exponentes se observa que el orden de importancia de las variables es

$$K, S, h, n, Z, w, D$$

lo cual coincide con la tabla recomendada por Booher (1974). Las mayores longitudes de surcos se presentan en suelos con baja conductividad hidráulica. Además, en suelos finos los coeficientes de rugosidad son pequeños. Por tanto, se confirma que en los suelos franco-arcillosos

($K = 0.0133$, mínimo usado en este trabajo) las longitudes son mayores.

Si el gasto constante, en l/s, para el riego continuo óptimo es:

$$Q_r = 0.7Q_c \quad (4)$$

donde el factor 0.7 es un promedio, para un intervalo de 0.6 a 0.78, de la relación entre los gastos óptimo del

riego continuo y máximo para el corte posterior, la eficiencia de aplicación máxima se obtiene con la ecuación:

$$E_{rm} = 1.52S^{-0.044} K^{0.097} n^{0.165} w^{0.012} h^{0.036} Z^{-0.029} D^{-0.064} \quad (5)$$

donde E_{rm} es adimensional y las variables restantes tienen las dimensiones de la ecuación 3. El coeficiente de correlación en esta ecuación es 0.88.

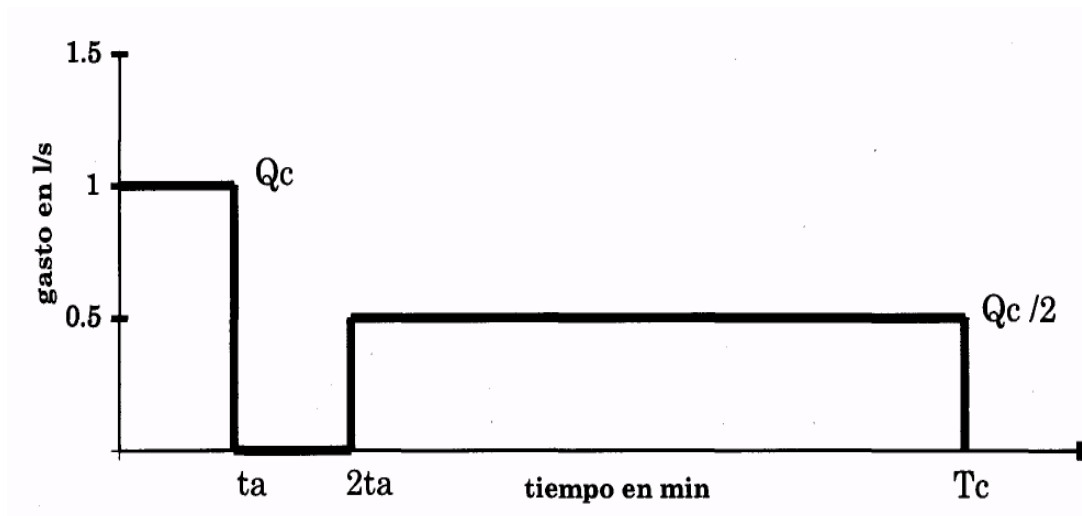


Figura 1. Hidrograma de ingreso en la primera mitad de la parcela

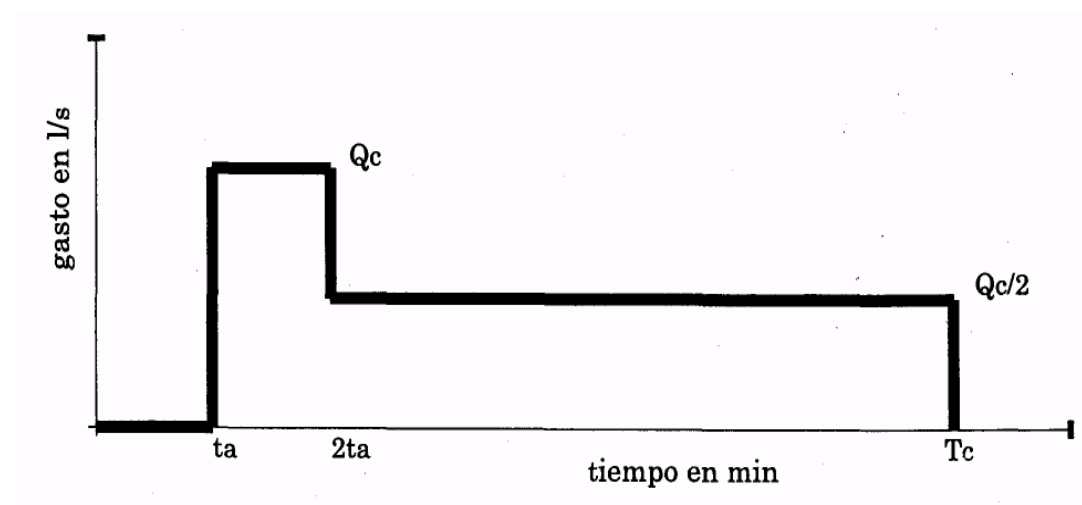


Figura 2. Hidrograma de ingreso en la segunda mitad de la parcela

b) Corte Posterior

Una manera práctica de regar la parcela con el método de corte posterior es hacerlo como lo propone Humpherys (en Jensen, 1980) al dividir la parcela en dos partes iguales. Así, se riega la primera parte hasta que el agua llegue al final del surco (tiempo de avance del agua, t_a) con el gasto Q_c ; después, se riega la segunda parte con el mismo gasto durante el mismo tiempo y ; por último, se riega toda la parcela con el gasto Q_c hasta un tiempo de riego total T_e . Esto es, en la primera mitad de la parcela el riego se hace con corte posterior discontinuo (ver Figura 1) con un gasto $Q_e = Q_c/2$ después de $2t_a$, y en la segunda mitad el riego se hace con corte posterior desfasado un tiempo t_a , con el gasto Q_c reducido en el tiempo $2t_a$ (ver Figura 2).

Las eficiencias obtenidas con el modelo matemático en las dos mitades de la parcela son muy parecidas, con una pequeña disminución de la eficiencia (no mayor de 1 %) en la primera mitad de la parcela para la misma dosis, pues el modelo matemático suspende el cálculo de la infiltración cuando no existe tirante de agua en el surco, continuando la infiltración después que se presenta nuevamente la carga hidráulica sobre el suelo.

Si ahora el gasto inicial con el corte posterior es el calculado con la ecuación 2, la eficiencia de aplicación máxima es:

$$E_{cm} = 1.91S^{-0.05}K^{0.103}n^{0.111}w^{-0.017}h^{0.046}Z^{-0.04}D^{-0.122} \quad (6)$$

En esta ecuación se conservan las dimensiones de la ecuación 5 y el coeficiente de correlación es 0.88.

Por otra parte, el tiempo de avance t_a en el corte posterior, escrito en función del gasto Q_c en lugar de la pendiente S (ver ecuación 2), y sin incluir la dosis Z , porque no influye, se obtiene como:

$$t_a = 0.74Lp^{0.917}Q_c^{-0.116}K^{0.018}n^{0.936}w^{-0.427}h^{0.311}D^{0.452} \quad (7)$$

donde t_a está en min, Q_c en l/s y las demás variables tienen las dimensiones de la ecuación 3. El coeficiente de correlación es 0.85.

c) Incremento de la eficiencia y ahorro de agua en el diseño

El volumen aplicado al surco con el método de corte posterior es menor que el empleado en el riego continuo, debido a que se reducen las pérdidas por coleos, por lo que se incrementa la eficiencia de E_{rm} a E_{cm} ; además,

existe un ahorro de agua, respecto al riego continuo óptimo, mayor al incremento de la eficiencia-de aplicación que se calcula con la ecuación:

$$A_g = \frac{E_{cm} - E_{rm}}{E_{cm}} \quad (8)$$

Al sustituir las eficiencias de aplicación máximas, ecuaciones 5 y 6, en la ecuación 8, se tiene que:

$$A_g = 1 - 0.8S^{0.006}K^{-0.006}n^{0.054}w^{0.029}h^{-0.01}Z^{0.011}D^{0.058} \quad (9)$$

donde A_g es adimensional y las siete variables independientes conservan las dimensiones de la ecuación 3. Obsérvese que las tres variables más significativas son D , n y w ; por tanto, el método de corte posterior produce mayores ahorros de agua cuando los valores de estas variables son pequeños, lo cual, en el caso de n y D , conduce a valores grandes de L_p (ver ecuación 3). Este resultado para L_p coincide con el de Bautista y Wallender (1993b), quienes concluyen que el método de corte posterior conviene aplicarlo en surcos largos.

d) Revisión con riego continuo

En la Figura 3 se muestran eficiencias de aplicación en tres surcos, menores a la máxima (E_{rm}), para gastos diferentes al óptimo del riego continuo ($0.7Q_c$) y longitudes diferentes a la óptima del corte posterior (L_p). En el eje horizontal se presenta la relación lineal entre longitud y gasto reales con longitud y gasto óptimos, a través del parámetro:

$$X_r = \frac{S Q_s L_p}{0.42 L_s} \quad (10)$$

donde Q_s es el gasto de aplicación real en l/s y L_s es la longitud real del surco en m. El valor de 0.42 se obtiene con la relación del gasto inicial en corte posterior (ecuación 2) y el óptimo del riego continuo (ecuación 4), esto es, $0.42 = 0.6 \cdot 0.7$.

e) Revisión con corte posterior

En la Figura 4, obtenida de manera similar que la Figura 3, se presentan resultados de las simulaciones numéricas en cuatro surcos con eficiencias menores a la máxima del corte posterior (E_{cm}); en este caso el parámetro adimensional en el eje horizontal es:

$$X_c = \frac{S Q_s L_p}{0.6 L_s} \quad (11)$$

f) Ahorro de agua en la revisión

$$Ag = \frac{Ec - Er}{Ec} \quad (12)$$

El ahorro de agua por regar con el método de corte posterior se calcula ahora con la ecuación

Con el fin de ilustrar el uso de las ecuaciones y gráficas, se presentan tres ejemplos de aplicación en el apéndice.

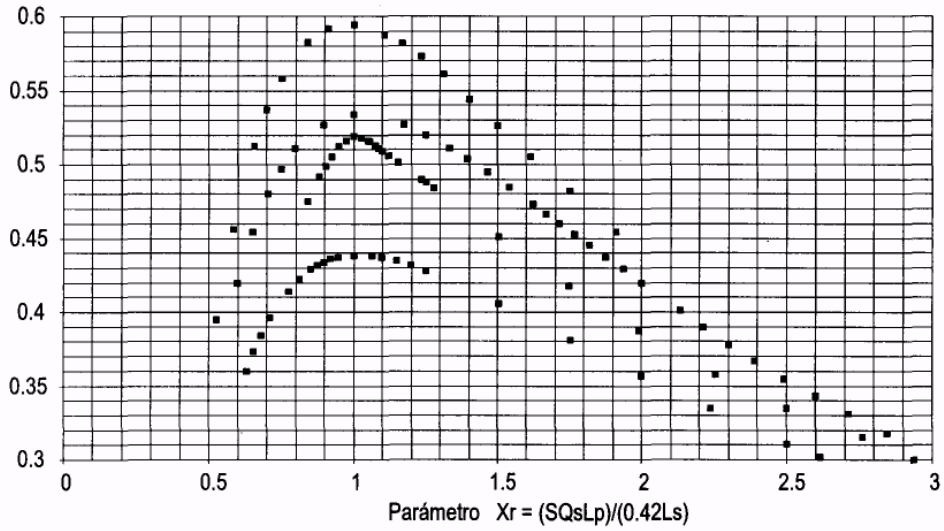


Figura 3. Gráfica para revisión de surcos con riego continuo

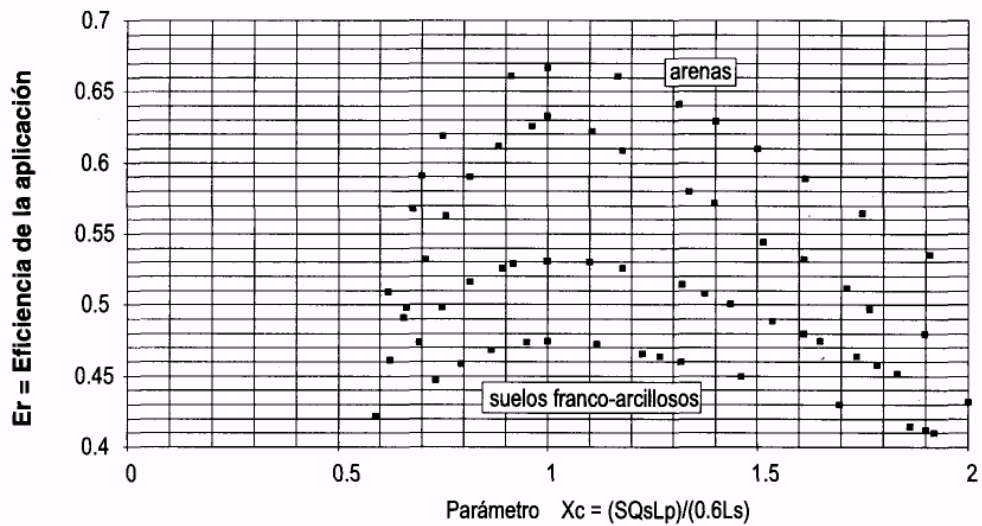


Figura 4. Gráfica para revisión de surcos con corte posterior

CONCLUSIONES

Sean problemas de diseño o revisión de surcos con riego continuo y corte posterior, las ecuaciones de regresión lineal múltiple y gráficas presentadas sustituyen el empleo del modelo matemático, siempre que los datos se encuentren dentro de los intervalos empleados en las simulaciones numéricas.

Las gráficas son útiles para revisar surcos en condiciones reales, para conocer las eficiencias de aplicación y decidir la conveniencia o no de regar con el método de corte posterior.

Después de calcular la longitud óptima de referencia (L_p) con los datos de las variables principales sustituidos en la ecuación de regresión correspondiente, es suficiente una simple operación aritmética para obtener el gasto de diseño en surcos con longitud fija (L_s) diferente a L_p ; la relación entre gastos y longitudes es lineal, para ello se usa el valor óptimo del parámetro adimensional X_r o X_c en las gráficas de revisión, que vale 1.

De acuerdo con los datos obtenidos en los 189 surcos diseñados para determinar las ecuaciones de regresión, se confirma que el método de corte posterior incrementa la eficiencia de aplicación del riego continuo óptimo; por tanto, se recomienda emplearlo en surcos con pendientes de 0.2 a 0.6 %, gastos iniciales de 1 a 3 l/s y en suelos arenosos a franco-arcillosos, donde el coeficiente de rugosidad varíe de 0.03 a 0.06. De preferencia, el método de corte posterior conviene usarlo en surcos largos (suelos francos o franco-arcillosos) con pequeña separación entre ellos y con la menor humedad inicial.

Cabe agregar que el modelo matemático fue calibrado con mediciones en un surco corto con suelo arenoso, pero falta validarlo con mediciones en el campo.

AGRADECIMIENTOS

Al Prof. José Luis Sánchez Bribiesca por sus valiosas orientaciones. Al Dr. Jesús Gracia Sánchez y al Comité Editorial de la Revista por las sugerencias que enriquecieron el trabajo.

REFERENCIAS

- Bautista, E. y W. W. Wallender (1992). *Hydrodynamic Furrow Irrigation Model with Specified Space Steps*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. Vol. 118. No. 3.
- Bautista, E. y W. W. Wallender (1993a). *Reliability of Optimized Furrow Infiltration Parameters*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. Vol. 119. No. 5.
- Bautista, E. y W. W. Wallender (1993b). *Optimal Management Strategies for Cutback Furrow*

Irrigation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. Vol. 119. No. 6.

- Booher, L. J. (1974). *Surface Irrigation. Development Paper No. 95. Land and Water Development Series No. 3. Food and Agriculture Organization of the United Nations*.
- Cemagref et Groupe France Agricole (1990). *Irrigation. R. Ned-ha. Montpellier. France*.
- Cuenca, R. H. (1989). *Irrigation Systems Design*. Prentice Hall. New Jersey, U. S. A.
- Chu, S. T. (1978). *Infiltration During an Unsteady Rain*. Water Resources Research. Vol. 14. No. 3.
- García, V. N. (1991). *Riego Intermitente. Ingeniería Hidráulica en México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*. Vol. VI. No. 2.
- Jensen, M. E. ed. (1980). *Design and Operation of Farm Irrigation Systems*. American Society of Agricultural Engineers.
- Juana, L. y A. Losada (1994). *Semejanza Hidrodinámica en Riegos por Superficie. Ingeniería del Agua*. Vol. 1. No. 1.
- Sánchez, J. L. y O. A. Fuentes (1992). Posibilidades de Incrementar la Eficiencia del Riego por Surcos. Informe Interno del Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Schmitz, G. H. y G. J. Seus (1992). *Mathematical Zero-Inertia Modeling of Surface Irrigation: Advance in Furrows*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. Vol. 118. No. 1.
- Vázquez, E. (1994). *Calibración de un Modelo Hidrodinámico para Riego por Surcos y Aplicaciones al Método de Corte Posterior*. Revista de Ingeniería. UNAM. Vol. LXIV. No. 4.
- Vázquez, E. (1996). Formulación de un Criterio para Incrementar la Eficiencia del Riego por Surcos, incluyendo el Método de Corte Posterior. Tesis Doctoral, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Walker, R. y G. Skogerboe (1987). Surface Irrigation. Prentice Hall, New Jersey, U. S. A., pp 142-144.

LISTA DE SÍMBOLOS

- Ag = Ahorro de agua
 D = Separación entre surcos, en cm
 Ec = Eficiencia de aplicación con corte posterior
 Er = Eficiencia de aplicación con riego continuo
 Ecm = Eficiencia de aplicación máxima con corte posterior

- Erm = Eficiencia de aplicación máxima con riego continuo
- H = Diferencia de humedad del suelo antes y después de humedecerse, en %
- h = Producto de las diferencias de tensiones y humedades del suelo antes y después de humedecerse, en cm
- K = Conductividad hidráulica del suelo, en cm/min
- Lp = Longitud óptima de referencia, en m
- Ls = Longitud real del surco, en m
- n = Coeficiente de rugosidad de Manning
- P = Perímetro mojado del surco
- q = Gasto de infiltración por unidad de longitud
- Qc = Gasto de riego inicial con corte posterior, en l/s
- Qe = Gasto de riego después del tiempo de avance con corte posterior, en l/s
- Qr = Gasto de alimentación con riego continuo, en l/s
- S = Pendiente del surco, en %
- T = Diferencia de tensiones del suelo antes y después de humedecerse, en cm
- ta = Tiempo de avance del agua con corte posterior, en min
- Te = Tiempo de riego con corte posterior, en min
- Tr = Tiempo de riego con riego continuo, en min
- w = Humedad inicial del suelo, en cm
- Xc = Parámetro para revisión de surcos con corte posterior
- Xr = Parámetro para revisión de surcos con riego continuo
- Z = Dosis por infiltrar, en cm
- Za = Lámina acumulada de infiltración, en cm

$$Lp = 4.85(0.3)^{-0.52}(0.045)^{-0.91}(0.04)^{-0.29} \\ (2.5)^{0.12}(9)^{-0.36}(10)^{0.28}(75)^{-0.08}$$

$$\rightarrow Lp = 265 \text{ m}$$

Eficiencia de aplicación máxima con riego continuo Con la ecuación 5

$$Erm = 1.52(0.3)^{-0.044}(0.045)^{-0.91}(0.04)^{-0.29} \\ (2.5)^{0.12}(9)^{-0.36}(10)^{-0.029}(75)^{-0.064}$$

$$\rightarrow Erm = 0.54$$

Eficiencia de aplicación máxima con corte posterior De la ecuación 6

$$Ecm = 1.91(0.3)^{-0.05}(0.045)^{0.103}(0.04)^{0.111} \\ (2.5)^{-0.017}(9)^{0.046}(10)^{-0.04}(75)^{-0.122}$$

$$\rightarrow Ecm = 0.60$$

Tiempo de riego (continuo)

El tiempo de riego, en minutos, se calcula con la ecuación

$$Tr = \frac{1000LpDZ}{60ErmQr} = \frac{1000(265)(0.75)(0.10)}{60(0.54)(1.4)} = 438 \text{ min}$$

Tiempo de riego con corte posterior

$$Tc = \frac{2000LpDZ}{60EcmQc} = \frac{2000(265)(0.75)(0.10)}{60(0.60)(2)} = 552 \text{ min}$$

Tiempo de avance con corte posterior

$$ta = 0.74(265)^{0.917}(2)^{-0.116}(0.045)^{0.018}(0.04)^{0.936} \\ (2.5)^{-0.427}(10)^{0.311}(75)^{0.452}$$

$$\rightarrow ta = 50 \text{ min}$$

Ahorro de agua

Con la ecuación 8 se obtiene

$$Ag = 1 - \frac{0.54}{0.60} = 0.10$$

es decir, para un incremento de la eficiencia del 6 % el ahorro de agua, por regar con el método de corte posterior, es del 10 %. Nótese que la comparación se hace con el riego continuo óptimo, por lo que conviene aplicar el método de corte posterior, no obstante que el incremento en el tiempo de riego es del 26 %

APÉNDICE. EJEMPLOS DE APLICACIÓN

Ejemplo 1

Sea un surco con pendiente $S = 0.3 \%$, conductividad hidráulica $K = 0.045 \text{ cm/min}$, coeficiente de rugosidad $n = 0.040$, humedad inicial del suelo $w = 2.5 \text{ cm}$, diferencia de tensiones y humedades del suelo $h = 9 \text{ cm}$ y separación entre surcos $D = 75 \text{ cm}$, en el cual se quiere infiltrar una dosis $Z = 10 \text{ cm}$. Se desean calcular las eficiencias con datos obtenidos a partir de las ecuaciones 2, 3 y 4.

Longitud óptima

El gasto en corte posterior es $Qc = 0.6/0.3 = 2 \text{ l/s}$ (ecuación 2), y en riego continuo $Qr = 0.7(2) = 1.4 \text{ l/s}$ (ecuación 4). De la ecuación 3, la longitud óptima es

Resultados con el modelo matemático

Riego continuo: $E_{rm} = 0.54$
 $T_r = 437$ min

Corte Posterior: $E_{cm} = 0.59$
 $T_c = 565$ min
 $t_a = 63$ min
 $A_g = 8.5$ %

estos resultados y los obtenidos con las ecuaciones de regresión son próximos.

Ejemplo 2

Supóngase ahora un surco con las mismas características del anterior, excepto que el gasto sea $Q_s = 1$ l/s y la longitud $L_s = 100$ m se desean conocer las eficiencias y tiempos de riego.

Parámetros adimensionales X_r y X_c

Con los datos del enunciado y las ecuaciones 10 y 11 se obtiene

$$X_r = \frac{SQ_sLP}{0.42 L_s} = \frac{0.3(1)(265)}{0.42(100)} = 1.89$$

$$X_c = \frac{SQ_sLp}{0.6 L_s} = \frac{0.3(1)(265)}{0.6(100)} = 1.33$$

Por ser diferentes de 1 se trata de un problema de revisión y deben usarse las figuras 3 y 4.

Eficiencias con las gráficas adimensionales

Primero se identifica la posición de las eficiencias máximas. Tanto en riego continuo ($E_{rm} = 0.54$, ecuación 5) como en corte posterior ($E_{cm} = 0.6$, ecuación 6), las eficiencias máximas se localizan en la parte media superior del intervalo de eficiencias para $X_r = 1$ y $X_c = 1$. Después, los valores de las eficiencias para $X_r = 1.89$ y $X_c = 1.33$ se encuentran en puntos semejantes del intervalo de las eficiencias. Tal como se indica en las gráficas, para riego continuo $E_r = 0.44$, y para corte posterior $E_c = 0.56$.

Ahorro de agua

El incremento de la eficiencia es del 12 %, con un ahorro de agua

$$A_g = 1 - \frac{0.44}{0.56} = 0.21 = 21 \%$$

En este caso, es mucho más conveniente regar con el método de corte posterior.

Tiempos de riego

Los tiempos de riego calculados con las eficiencias

obtenidas a través de las gráficas son; para riego continuo

$$T_r = \frac{1000(100)(0.75)(0.10)}{60(0.44)(1)} = 274 \text{ min}$$

y para corte posterior

$$T_c = \frac{2000(100)(0.75)(0.10)}{60(0.56)(1)} = 446 \text{ min}$$

Resultados con el modelo matemático

Riego continuo: $E_r = 0.41$
 $T_r = 303$ min

Corte posterior: $E_c = 0.58$
 $T_e = 430$ min
 $t_a = 18$ min
 $A_g = 29$ %

Se comprueba ahora que estos resultados y los obtenidos en las gráficas son parecidos.

Ejemplo 3

Con los mismos datos del ejemplo anterior, excepto el gasto, se desean calcular los gastos óptimos.

Riego continuo

El valor óptimo del parámetro adimensional en el eje horizontal de la figura 3 es $X_r = 1$; entonces, con la longitud real $L_s = 100$ m, de la ecuación 10 se despeja Q_s , esto es

$$Q_s = \frac{0.42L_s}{SLp} = \frac{0.6(100)}{0.3(265)} = 0.53 \text{ l/s}$$

Corte posterior

Para el valor máximo $X_c = 1$ en la figura 4, y de la ecuación 11

$$Q_s = \frac{0.6L_s}{SLp} = \frac{0.6(100)}{0.3(265)} = 0.75 \text{ l/s}$$

Eficiencias de aplicación con el modelo matemático

Riego continuo: $E_r = 0.55$ (0.54, ecuación 5)

Corte posterior: $E_c = 0.65$ (0.60, ecuación 6)

Ahorro de agua

$$A_g = 1 - \frac{0.55}{0.65} = 0.15 = 15 \%$$

En el primer ejemplo se obtuvo un ahorro de agua del 10 % con las eficiencias proporcionadas por las ecuaciones 5 y 6. La conclusión práctica en aquel ejemplo como en este es la misma: conviene emplear el método de corte posterior.