

Diseño de riego continuo en surcos a partir de datos de campo

Nahun Hamed García Villanueva
Ariosto Aguilar Chávez

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, CNA

En este trabajo se propone un método semi-analítico para el diseño de riego continuo en surcos. El método parte de la obtención de una serie de datos de campo fácilmente medibles, por medio de los cuales se determinan las curvas empíricas de avance y recesión de onda. Posteriormente, se establece la ecuación de infiltración acumulada, a partir de un planteamiento de balance de volumen entre los volúmenes suministrados, infiltrados y almacenados en el surco durante el avance del frente de onda. Por último, se plantea una serie de ecuaciones, con las cuales es factible diseñar los surcos en función de la relación que existe entre la longitud del surco y las eficiencias de aplicación y distribución del suministro de agua.

Determinación experimental de la infiltración en surcos

La capacidad de infiltración del suelo se incluye entre los principales factores que deben tomarse en cuenta para el diseño y evaluación de un sistema de riego por surcos. Una sobreestimación de la capacidad de infiltración del suelo, casi siempre implica que del diseño, basado en ciertas eficiencias de aplicación y distribución, resulte un sistema de riego con una longitud de surco menor a la real, lo que origina que en la práctica se presenten mayores pérdidas por coleos a las esperadas de acuerdo con el diseño preliminar. Por el contrario, el subestimar la capacidad de infiltración conduce a un sistema de riego con una longitud mayor a la que realmente corresponde a la eficiencia de diseño y, por lo tanto, en la práctica se obtendrán pérdidas por infiltración profunda mayores a las estimadas durante el diseño. En ambos casos los sistemas de riego serán incapaces de suministrar al suelo los volúmenes de agua apropiados para satisfacer de manera adecuada las necesidades hídricas de los cultivos, lo que se traduce indirectamente en rendimientos agrícolas menores a los esperados.

Una de las ecuaciones empíricas más conocidas para representar la capacidad de infiltración de un suelo agrícola, es la de infiltración propuesta por Kostiakov en 1932 (Walker y Skogerboe, 1987):

$$Z = k' \tau^{a'}$$

Esta ecuación ha sido estudiada y modificada por diversos especialistas (Phillip, 1957). Una de las versiones de mayor aceptación y uso es la conocida como ecuación modificada de Kostiakov-Lewis:

$$Z = k\tau^a + f_0\tau$$

Con el fin de aplicarla para evaluar la infiltración media en surcos, se han propuesto y desarrollado varios métodos teórico-prácticos. El objetivo fundamental de éstos es el de cuantificar, con auxilio de técnicas empíricas, los coeficientes constantes que intervienen en la ecuación de Kostiakov-Lewis. Para la obtención de estos coeficientes, los métodos que actualmente se consideran más apropiados, son los basados en el balance temporal entre el volumen suministrado en la cabecera del surco, los almacenados tanto superficial como subsuperficialmente a lo largo

del surco y el volumen descargado al final del mismo (Elliot y Walker, 1982; Smerdon y Reddell, 1988; Detav, 1989).

En general, los métodos de balance de volumen se derivan directa o indirectamente de la aplicación de la ecuación de conservación de masa. Suelen basarse en la aplicación del principio de conservación de masa para representar el fenómeno de infiltración durante el avance del frente de onda y el estado final de flujo permanente en el surco.

Obtención de los parámetros de la ecuación de Kostiaikov

La versión integral de la ecuación de conservación de masa aplicable a un flujo unidimensional a superficie libre, como el que ocurre durante el avance del frente de onda originado por el proceso de riego en surcos (véase ilustración 1), está dada por la relación siguiente:

$$\begin{aligned} & \int_0^{tav} (Q_s - Q_0) dt \\ & + \int_0^s (A^{tav} - A^0) ds \\ & + \int_0^s (Z^{tav} - Z^0) ds = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Durante el avance se cumple, independientemente de la distancia al frente de onda (s) y del tiempo de avance (tav), lo siguiente:

$$Q_s = 0$$

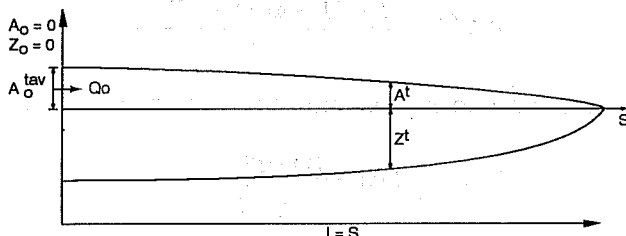
$$A^0 = 0$$

$$Z^0 = 0$$

Por lo tanto, la relación (1) se reduce a:

$$-\int_0^{tav} Q_0 dt + \int_0^s A^{tav} ds + \int_0^s Z^{tav} ds = 0 \quad (2)$$

1. Distribución de perfiles de flujo superficial y subsuperficial durante el avance del frente de onda



La magnitud del gasto de alimentación (Q_0) con que se alimenta el surco se puede considerar aproximadamente constante (véase ilustración 2), de aquí que la ecuación anterior se pueda expresar en la forma:

$$-Q_0 tav + \int_0^s A^{tav} ds + \int_0^s Z^{tav} ds = 0 \quad (3)$$

El volumen almacenado en la parte superficial del surco se puede expresar en función del área hidráulica que se establece al inicio del mismo después de un tiempo tav , (A_0^{tav}), tal y como se indica a continuación (Elliot y Walker, 1982):

$$\int_0^s A^{tav} ds = \sigma_y A_0^{tav} s \quad (4)$$

De la misma manera, el volumen infiltrado durante el tiempo tav se puede expresar en función del volumen infiltrado por unidad de longitud de surco al inicio del mismo, después de un tiempo de oportunidad igual a tav :

$$\int_0^s Z^{tav} ds = \sigma_z Z_0^{tav} s \quad (5)$$

Sustituyendo (4) y (5) en (3), resulta:

$$-Q_0 tav + \sigma_y A_0^{tav} s + \sigma_z Z_0^{tav} s = 0 \quad (6)$$

Si se plantea esta ecuación para los tiempos (véase ilustración 3):

$$tav = t_{l/4}$$

$$tav = t_{l/2}$$

$$tav = t_l$$

Se obtiene, para cada uno de los tiempos propuestos:

$$Q_0 t_{l/4} - \sigma_z Z_0^{t_{l/4}} l/4 = \sigma_y A_0^{t_{l/4}} l/4 \quad (7)$$

$$Q_0 t_{l/2} - \sigma_z Z_0^{t_{l/2}} l/2 = \sigma_y A_0^{t_{l/2}} l/2 \quad (8)$$

$$Q_0 t_l - \sigma_z Z_0^{t_l} l = \sigma_y A_0^{t_l} l \quad (9)$$

Dividiendo (9) entre (8) y considerando que el flujo se normaliza de inmediato (en la práctica esto ocurre normalmente entre los primeros 10 y 15 minutos de riego) $A_0^{t_l} = A_0^{t_{l/2}} = A_0^{t_{l/4}}$, resulta:

$$\frac{Q_0 t_l - \sigma_z Z_0^{t_l}}{Q_0 t_{l/2} - \sigma_z Z_0^{t_{l/2}}} = 2$$

$$Q_0(t_l - 2t_{l/2}) = -\sigma_z l(Z_0^{t_{l/2}} - Z_0^{t_l}) \quad (10)$$

Por un procedimiento semejante, al dividir (9) entre (7):

$$Q_0(t_l - 4t_{l/4}) = -\sigma_z l(Z_0^{t_{l/4}} - Z_0^{t_l}) \quad (11)$$

Dividiendo (10) entre (11):

$$\frac{t_l - 2t_{l/2}}{t_l - 4t_{l/4}} = \frac{Z_0^{t_{l/2}} - Z_0^{t_l}}{Z_0^{t_{l/4}} - Z_0^{t_l}} \quad (12)$$

Al considerar que Z está dada por una función empírica del tipo propuesto originalmente por Kostiakov:

$$Z = k' r^{a'} \quad (13)$$

Tomando en consideración (13) en (12), resulta:

$$\frac{t_{l/2}^{a'} - t_l^{a'}}{t_{l/4}^{a'} - t_l^{a'}} = \frac{t_l - 2t_{l/2}}{t_l - 4t_{l/4}} \quad (14)$$

Por otro lado, el avance del frente de onda durante el riego se puede representar por una relación del tipo:

$$s = p t a v^r,$$

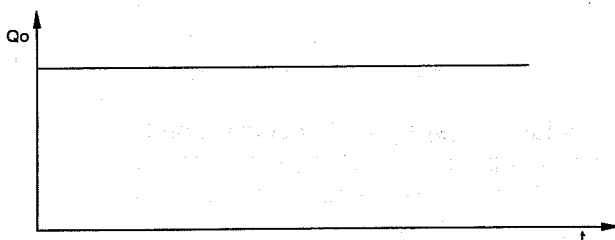
despejando tav :

$$tav = (s/p)^{1/r} = P s^R \quad (15)$$

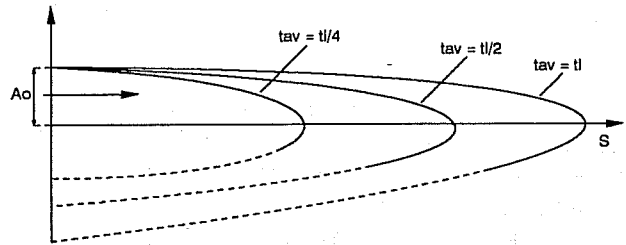
si se consideran las posiciones $s = 1$, $s = 1/2$ y $s = 1/4$, se tendrá:

$$t_l = P l^R \quad (16)$$

2. Caudal suministrado al surco



3. Avance del frente de onda para diferentes tiempos



$$t_{l/2} = P(0.5 l)^R \quad (17)$$

$$t_{l/4} = P(0.25 l)^R \quad (18)$$

Sustituyendo (16), (17) y (18) en (14):

$$\frac{P a' (0.5 l)^{R a'} - P a' l^{R a'}}{P a' (0.25 l)^{R a'} - P a' l^{R a'}} = \frac{P l^R - 2P(0.5 l)^R}{P l^R - 4P(0.25 l)^R}$$

Simplificando algebraicamente:

$$\frac{0.5^{R a'} - 1}{0.25^{R a'} - 1} = \frac{1 - 2(0.5)^R}{1 - 4(0.25)^R} \quad (19)$$

asignando:

$$F = \frac{1 - 2(0.5)^R}{1 - 4(0.25)^R} \quad (20)$$

Sustituyendo (20) en (19):

$$0.5^{R a'} - (0.5^{R a'})^2 F + (F - 1) = 0$$

Por un cambio de variables $X = 0.5^{R a'}$, se obtiene:

$$X^2 - X/F + \frac{(1 - F)}{F} = 0$$

Despejando X :

$$X = \frac{1 - (1 + 4(F^2 - F))^{0.5}}{2F} \quad (21)$$

Invirtiendo el cambio de variables:

$$0.5^{R a'} = \frac{1 - (1 + 4(F^2 - F))^{0.5}}{2F}$$

Despejando a' y tomando en cuenta que $R = 1/r$:

$$a' = \frac{r \log\left(\frac{1 - (1 + 4(F^2 - F))^{0.5}}{2F}\right)}{\log(0.5)} \quad (22)$$

Por otra parte, de la ecuación (10) se tiene:

$$Z_0^{t_{l/2}} - Z_0^{t_l} = \frac{Q_0(2t_{l/2} - t_l)}{\sigma_z l}$$

Al tomar en cuenta la ecuación de Kostiakov (13), resulta:

$$k'(t_{l/2}^{a'} - t_l^{a'}) = \frac{Q_0(2t_{l/2} - t_l)}{\sigma_z l}$$

Despejando k' ,

$$k' = \frac{Q_0(2t_{l/2} - t_l)}{\sigma_z l(t_{l/2}^{a'} - t_l^{a'})} \quad (23)$$

Sustituyendo (16), (17) y (18) en (23) y operando algebraicamente, resulta:

$$k' = \frac{Q_0(2(0.5)^{1/r} - 1)}{\sigma_z l(0.5^{a'/r} - 1)} \left(\frac{l}{p}\right)^{\frac{1-a'}{r}} \quad (24)$$

En esta ecuación σ_z se evalúa con la siguiente expresión (Kiefer, 1959):

$$\sigma_z = \frac{a' + r(1 - a') + 1}{(1 + a')(1 + r)}$$

Obtención de los coeficientes de la ecuación de Kostiakov-Lewis

La magnitud de la velocidad de infiltración básica (f_0), se obtiene a partir de datos experimentales de acuerdo con la siguiente expresión:

$$f_0 = \frac{Q_0 - Q_{fs}}{l} \quad (25)$$

Para la obtención de los coeficientes k y a de la ecuación de Kostiakov-Lewis, en este trabajo se considera que el volumen infiltrado por unidad de longitud de surco, durante el intervalo de tiempo comprendido entre 0 y el tiempo (tb) transcurrido para alcanzar la infiltración básica, puede calcularse adecuadamente con la ecuación (13). De esto se desprende que, dentro del intervalo de tiempo indicado, se cumple la siguiente relación:

$$k' \tau^{a'} = k \tau^a + f_0 \tau$$

donde

$$0 \leq \tau \leq tb,$$

Despejando $k \tau^a$

$$k \tau^a = k' \tau^{a'} - f_0 \tau \quad (26)$$

adoptando $\tau = 1$ y $\tau = tb$, se obtiene:

$$k = k' - f_0 \quad (27)$$

$$k tb^a = k' tb^{a'} - f_0 tb \quad (28)$$

sustituyendo (27) en (28) y despejando "a", resulta:

$$a = \frac{\log\left(\frac{k' tb^{a'} - f_0 tb}{k' - f_0}\right)}{\log(tb)} \quad (29)$$

Para obtener el valor de tb se deriva la ecuación (13) con respecto al tiempo y se iguala con f_0 :

$$k' a' t_b^{a'-1} = f_0$$

de donde

$$t_b = \left(\frac{f_0}{k' a'}\right)^{\frac{1}{a'-1}} \quad (30)$$

Diseño de riego continuo

Se considera que previamente se han obtenido la lámina de riego (Lr), el gasto máximo no erosivo o gasto de alimentación suministrado a un surco (Q_0) y las siguientes relaciones empíricas.

- Ecuación empírica de infiltración acumulada.

$$Z = k \tau^a + f_0 \tau \quad (31)$$

- Ecuación empírica del avance del frente de onda.

$$tav = P s^R \quad (32)$$

- Ecuación empírica de la onda de recesión.

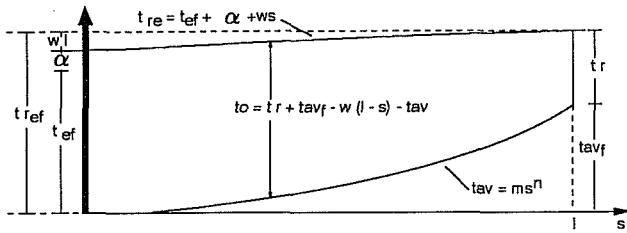
$$\Delta tr = \alpha + \omega s \quad (33)$$

En la ilustración 4, se presenta una figura del avance y recesión de onda.

NOTA:

Es importante que las relaciones (31), (32) y (33) sean obtenidas cuando el surco presente condiciones de humedad inicial semejantes a las condiciones en que generalmente se darán los riegos en la práctica.

4. Distribución de tiempos



Determinación del tiempo efectivo de riego (t_{ef})

De la misma ilustración, se concluye que el tiempo en que la onda de recesión alcanza una cierta posición " s " sobre el surco, está dado por:

$$t_{re} = t_{ef} + \alpha + ws \quad (34)$$

de aquí que el tiempo en que la onda de recesión alcanza el final del surco sea:

$$t_{ref} = t_{ef} + \alpha + wl \quad (35)$$

En la misma ilustración 4, se observa que:

$$t_{ref} = t_r + t_{avf} \quad (36)$$

Igualando (36) con (35) y despejando el tiempo efectivo de riego:

$$t_{ef} = t_r + t_{avf} - \alpha - wl \quad (37)$$

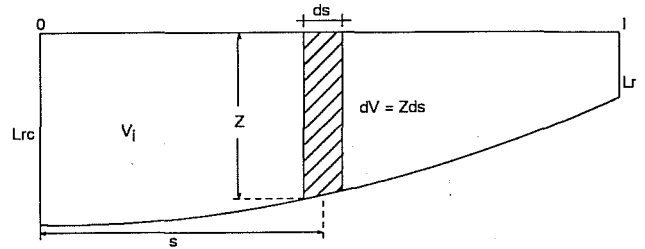
Finalmente, al sustituir (32), y al considerar $s = l$, en (37), resulta:

$$t_{ef} = t_r + Pl^R - \alpha - wl \quad (38)$$

Determinación de la eficiencia de distribución del riego

En este trabajo se define como eficiencia de distribución a la razón en porcentaje que existe entre la lámina de riego aplicada al final del surco y la lámina aplicada en la cabecera del mismo, expresadas ambas en volumen por unidad de longitud de surco. Es importante hacer notar, y fácil de comprender con auxilio de la ilustración 5, que la relación entre las láminas de riego aplicadas entre estos dos extremos es la más desfavorable que se puede encontrar entre dos secciones cualesquiera del surco. La relación algebraica que representa esta

5. Evaluación del volumen total infiltrado



eficiencia está dada por la siguiente expresión:

$$Ed = \frac{Lr}{Lr_c} 100 \quad (39)$$

De la ecuación (31) se tiene que la lámina de riego aplicada, o sea, el volumen infiltrado por unidad de longitud de surco en una cierta sección de éste, depende del tiempo de oportunidad que el flujo permanece sobre dicha sección. De aquí que la ecuación (39), de acuerdo con los tiempos de aplicación indicados en la ilustración 3, se pueda también expresar en la forma:

$$Ed = \left[\frac{Lr}{f_0(t_{ef} + \alpha) + k(t_{ef} + \alpha)^a} \right] 100 \quad (40)$$

Si además de la ecuación (38), se tiene:

$$t_{ef} = t_r + Pl^R - \alpha - wl$$

Al sustituir en (40) resulta finalmente:

$$Ed = \left[\frac{Lr}{f_0(t_r + Pl^R - wl) + k(t_r + Pl^R - wl)^a} \right] 100 \quad (41)$$

De esta relación, tomando en cuenta que $Lr = f_0 t_r + k t_r^a$, se observa que para obtener una eficiencia de distribución del 100% se requiere que se cumpla la igualdad $wl = Pl^R$.

Desafortunadamente, en general esta situación se satisface para surcos de longitud muy corta, lo cual hace impráctico un diseño con esta eficiencia. Un criterio aceptable, que conduce a diseños con longitud de surco recomendables en la práctica, es el de adoptar eficiencias de distribución superiores al 75%.

Determinación del porcentaje de pérdidas por coleos

Se denomina pérdida por coleo al volumen de agua de riego que escurre fuera del surco. El porcentaje de estas pérdidas con respecto al volumen total de

agua suministrada durante el riego, está dado por la siguiente relación:

$$C_0 = \left(\frac{V_{\text{suministrado}} - V_i}{V_{\text{suministrado}}} \right) 100$$

$$= \left(1 - \frac{V_i}{Q_0 t_{ef}} \right) 100 \quad (42)$$

Es importante observar que el volumen total suministrado es igual al producto del tiempo efectivo de suministro del agua de riego (t_{ef}) por el gasto suministrado (Q_0).

Para determinar el volumen total infiltrado durante el riego (V_i), se procede como se indica a continuación (véase ilustración 5):

$$dV_i = Z ds$$

integrando, con respecto a s , límites entre el inicio ($s = 0$) y final del surco ($s = l$), se tiene:

$$V_i = \int_0^l Z ds \quad (43)$$

Si Z se expresa en función del tiempo de oportunidad τ , de acuerdo con la ecuación (31), y se sustituye en (43):

$$V_i = \int_0^l (f_0 \tau + k \tau^a) ds \quad (44)$$

De la ilustración 4 se deduce que:

$$\tau = tr + Pl^R - Ps^R - \omega(l - s) \quad (45)$$

sustituyendo (45) en (44)

$$V_i = \int_0^l \{ f_0 [tr + Pl^R - Ps^R - \omega(l - s)] + k [tr + Pl^R - Ps^R - \omega(l - s)]^a \} ds$$

integrando el primer miembro, resulta:

$$V_i = f_0 trl + f_0 Pl^{R+1} - \frac{f_0 P}{R+1} l^{R+1} - f_0 \omega \frac{l^2}{2}$$

$$+ \int_0^l k [tr + Pl^R - Ps^R - \omega(l - s)]^a ds \quad (46)$$

Con el fin de simplificar la integración del término restante se aproximará la relación $1 - s$, considerándola como un valor promedio a lo largo del

surco, e igual con $l/2$. Es importante indicar que esta simplificación prácticamente no afecta el resultado global de la integración.

De acuerdo con lo anterior, la expresión (46) se reduce a:

$$V_i = f_0 trl + f_0 Pl^{R+1} - \frac{f_0 P}{R+1} l^{R+1} - f_0 \omega \frac{l^2}{2}$$

$$+ \int_0^l k [tr + Pl^R - Ps^R - \omega(l/2)]^a ds \quad (47)$$

si se asigna,

$$ta = tr + Pl^R - \omega l/2 \quad (48)$$

la ecuación (47) se puede escribir en la forma siguiente:

$$V_i = f_0 trl + f_0 Pl^{R+1} - \frac{f_0 P}{R+1} l^{R+1} - f_0 \omega \frac{l^2}{2}$$

$$+ k \int_0^l (ta - Ps^R)^a ds \quad (49)$$

Para integrar el término restante, se recurre a la siguiente aproximación por series del binomio elevado a una potencia:

$$(ta - Ps^R)^a = ta^a - f_0 ta^{a-1} Ps^R$$

$$+ \frac{a(a-1)}{2} ta^{a-2} P^2 s^{2R}$$

$$- \frac{a(a-1)(a-2)}{6} ta^{a-3} P^3 s^{3R} \quad (50)$$

por lo tanto, la integral resulta ser:

$$k \int_0^l (ta - Ps^R)^a ds =$$

$$k ta^a l - k f_0 ta^{a-1} \frac{P}{R+1} l^{R+1}$$

$$+ k \frac{a(a-1)}{2} ta^{a-2} \frac{P^2}{2R+1} l^{2R+1}$$

$$- k \frac{a(a-1)(a-2)}{6} ta^{a-3} \frac{P^3}{3R+1} l^{3R+1} \quad (51)$$

Al sustituir (51) en (49) y agrupar los términos, se obtiene:

$$V_i = Al + Bl^{R+1} + Cl^2 + Dl^{2R+1} + El^{3R+1} \quad (52)$$

donde,

$$A = f_0 tr + k ta^a$$

$$B = f_0 \frac{Rp}{R+1} - k f_0 ta^{a-1} \frac{P}{R+1}$$

$$C = -f_0 \frac{\omega}{2}$$

$$D = k \frac{a(a-1)}{2} ta^{a-2} \frac{P^2}{2R+1}$$

$$E = -k \frac{a(a-1)(a-2)}{6} ta^{a-3} \frac{P^3}{3R+1}$$

Sustituyendo (52) en (42)

$$C_0 = \left[1 - \left(\frac{Al + Bl^{R+1}}{Q_0 tef} + \frac{Cl^2 + Dl^{2R+1} + El^{3R+1}}{Q_0 tef} \right) \right] 100 \quad (53)$$

Determinación de las pérdidas por percolación profunda

El porcentaje perdido por percolación profunda, respecto al total suministrado, se calcula con la relación:

$$Pe = \left[\frac{V_i - Lrl}{Q_0 tef} \right] 100 \quad (54)$$

Determinación de la eficiencia de aplicación

La eficiencia de aplicación se define como la relación entre el volumen requerido para el riego y el volumen total suministrado (Hansen, 1981).

$$Ea = \frac{Lrl}{Q_0 tef} 100 = 100 - C_0 - Pe \quad (55)$$

Es importante indicar que esta expresión es válida para valores de Ea comprendidos entre 0 y 100% (todo valor fuera de este rango no tiene significado físico). Con el fin de tener pocas pérdidas globales (pérdidas por coleos + pérdidas por percolación profunda) y mantener longitudes de surco aceptables en la práctica, se recomienda adoptar eficiencias de aplicación superiores al 65%.

Secuencia de diseño

Datos de campo

Para la aplicación del método se considera que previamente, en el campo, se han obtenido los siguientes datos:

Q_0 = gasto de alimentación suministrado al surco en la cabecera.

Se recomienda obtenerlo con un aforador para surco. En el caso de que no se cuente con equipo de aforo especial, este dato se puede obtener, de manera aproximada, dividiendo el módulo de riego (mr) entre el número de surcos (ns): $Q_0 = mr/ns$

Q_{fs} = gasto descargado al final del surco una vez que se alcanza un estado de flujo superficial permanente durante riego continuo.

Este dato se puede obtener con un aforo volumétrico al final del surco. Para esto se recomienda utilizar un recipiente, con una capacidad superior a 20 l, previamente calibrado y un reloj con cronómetro. El aforo se debe realizar una hora después de iniciada la descarga al final del surco. Dicho aforo se repite cada 15 min hasta que no se varíe el caudal medido. El último caudal medido corresponde al Q_{fs} .

l = longitud del surco; corresponde a la distancia comprendida entre la cabecera del surco y la posición en que se encuentra ubicada la sección en la cual se determinó el gasto Q_{fs} .

$t_{13/4}$ = tiempo que transcurre entre el inicio del riego y el momento en que el frente de onda alcanza 3/4 partes de la longitud del surco.

Se obtiene colocando una estaca a 3/4 de la longitud total del surco y midiendo con un cronómetro el tiempo que tarda la onda de avance en alcanzar dicha posición.

t_l = tiempo que transcurre entre el inicio del riego y el momento en que el frente de onda alcanza la longitud del surco (l).

Se obtiene midiendo con un cronómetro el tiempo que tarda la onda de avance en alcanzar el final del surco.

α = parámetro de la ecuación de recesión de onda.

Se obtiene midiendo el tiempo que tarda en eliminarse el flujo en la cabecera del surco, medido a partir del momento en que se realizó el corte del suministro del caudal Q_0 .

ω = parámetro de la ecuación de recesión de onda.

Se obtiene midiendo el tiempo que dura la onda de recesión en alcanzar el final del surco (*trcf*): $w = trcf/l$

trcf = intervalo de tiempo comprendido entre el momento en que el flujo desaparece en la cabecera y al final del surco.

Cálculos

- Cálculo de los coeficientes de la función de avance del frente de onda:

$$r = \frac{\log(1.333)}{\log(t_1/t_{13/4})}$$

$$p = \frac{l}{t_1^r}$$

$$R = 1/r$$

$$P = (1/p)^R$$

- Cálculo de los coeficientes de la ecuación de Kostiakov:

$$F = \frac{1 - 2(0.5)^R}{1 - 4(0.25)^R}$$

$$a' = \frac{r \log\left(\frac{1 - (1 + 4(F^2 - F))^{0.5}}{2F}\right)}{\log(0.5)}$$

$$\sigma_z = \frac{a' + r(1 - a') + 1}{(1 + a')(1 + r)}$$

$$k' = \frac{Q_0(2(0.5)^{1/r} - 1)}{\sigma_z l(0.5^{a'/r} - 1)} \left(\frac{l}{p}\right)^{\left(\frac{1-a'}{r}\right)}$$

- Cálculo de los coeficientes de la ecuación de Kostiakov-Lewis:

$$f_0 = \frac{Q_0 - Q_{fs}}{l}$$

$$k = k' - f_0$$

$$tb = \left(\frac{f_0}{k'a'}\right)^{\left(\frac{1}{a'-1}\right)}$$

$$a = \frac{\log\left(\frac{k'tb^{a'} - f_0}{k' - f_0}\right)}{\log(tb)}$$

- Diseño del surco

Si se evalúa previamente *tr*, y se considera $Z = Lr$ en la ecuación (31), al sustituir diversos valores de *l* en las ecuaciones (38), (40), (53),

(54) y (55), se puede realizar una gráfica como la mostrada en la ilustración 6. Esta gráfica se elaboró con datos de un caso particular, pero su forma es representativa de lo que se obtendría con datos de otra parcela.

Una vez realizada esta gráfica es fácil elegir un diseño de surco apropiado. Normalmente se deberá optar por una solución en que tanto la eficiencia de aplicación ($Ea > 65\%$) como la de distribución ($Ed > 75\%$) sean lo más grande posible. Un diseño con una eficiencia de aplicación inferior al 60% se debe considerar como pésimo.

En esta gráfica se puede apreciar la variación de longitudes de surco, correspondiente al rango de eficiencias de distribución superiores al 75%. Nótese que un pequeño sacrificio en la eficiencia de distribución, que realmente representa incrementos moderados en pérdidas por percolación profunda, implica poder aumentar sustancialmente la eficiencia de aplicación *Ea* y la longitud de surco.

Es importante recalcar que la máxima longitud de surco, recomendable para la implementación práctica del riego continuo, corresponde a la longitud en que se eliminan las pérdidas por coleos. Su eliminación indica que el gasto suministrado se ha infiltrado totalmente a lo largo del surco.

En resumen, una secuencia práctica de diseño consiste en los siguientes pasos:

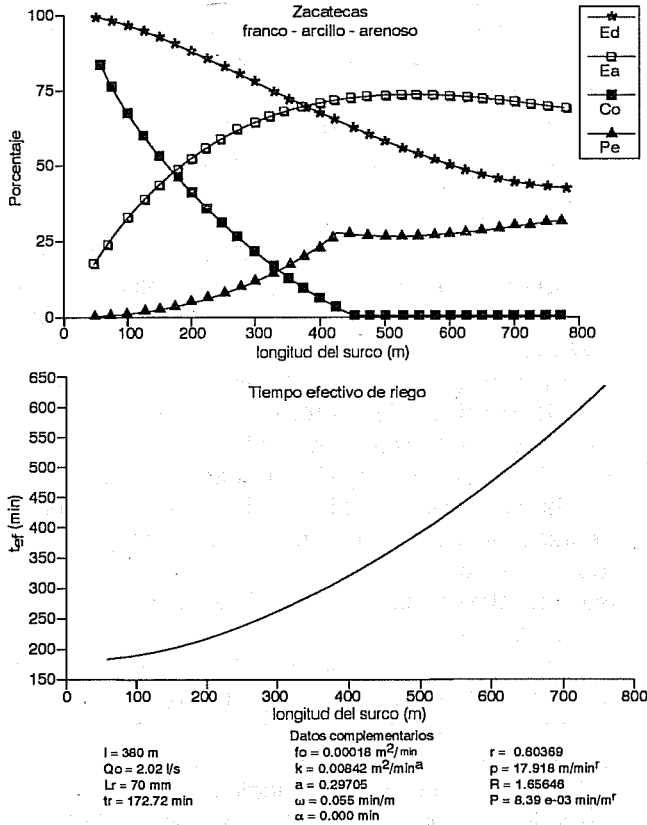
- Generar una gráfica *l* vs *Ea*, *Ed*.
- Verificar si la longitud real de la parcela, donde se pretende implementar el riego, se encuentra comprendida en el rango de longitudes (*l*) con eficiencias de aplicación (*Ea*) superiores al 65%.

En caso de que se encuentre dentro del rango, se adopta como longitud de surco de diseño (*l*) y se anotan las eficiencias de distribución y aplicación que le corresponden. En caso contrario, se deben implementar métodos alternativos como: riego continuo con recorte de caudal, riego por aspersión, por goteo, etc. Otra opción, que en ocasiones da buenos resultados, es disminuir la lámina de riego.

- Una vez seleccionada la longitud de surco se calculan los siguientes datos complementarios del diseño:

tef = tiempo efectivo de riego, o sea, el tiempo total que se estará suministrando gasto en la cabecera.

6. Gráficas para diseño



V_i = volumen total infiltrado

E_a = eficiencia de aplicación

Co = porcentaje de pérdidas por coleos

Pe = porcentaje de pérdidas por percolación profunda

V_s = volumen total suministrado al surco.

Ejemplos de aplicación

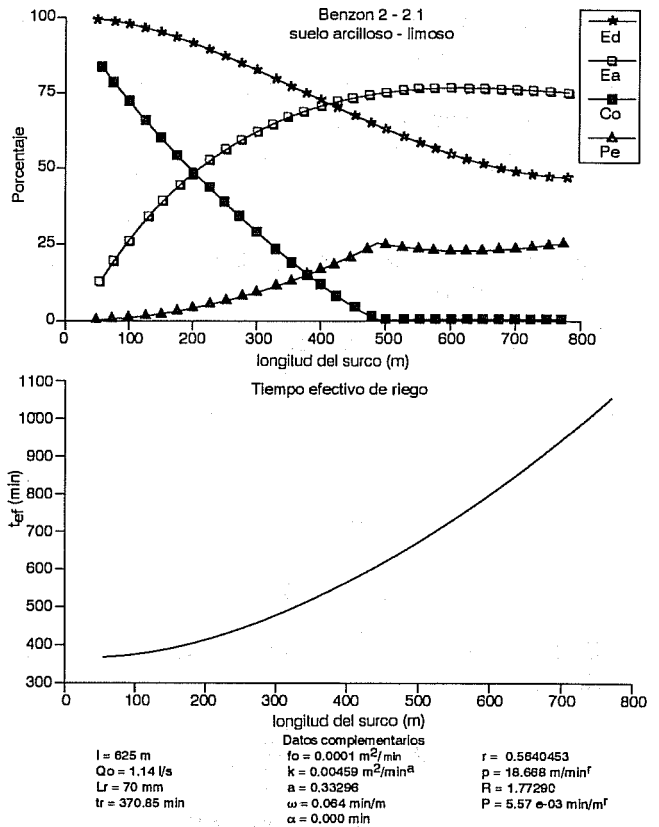
Con el fin de ejemplificar la aplicabilidad del método propuesto, en las ilustraciones 7, 8, 9 y 10 se muestran las gráficas obtenidas para cuatro tipos diferentes de suelo.

Conclusiones

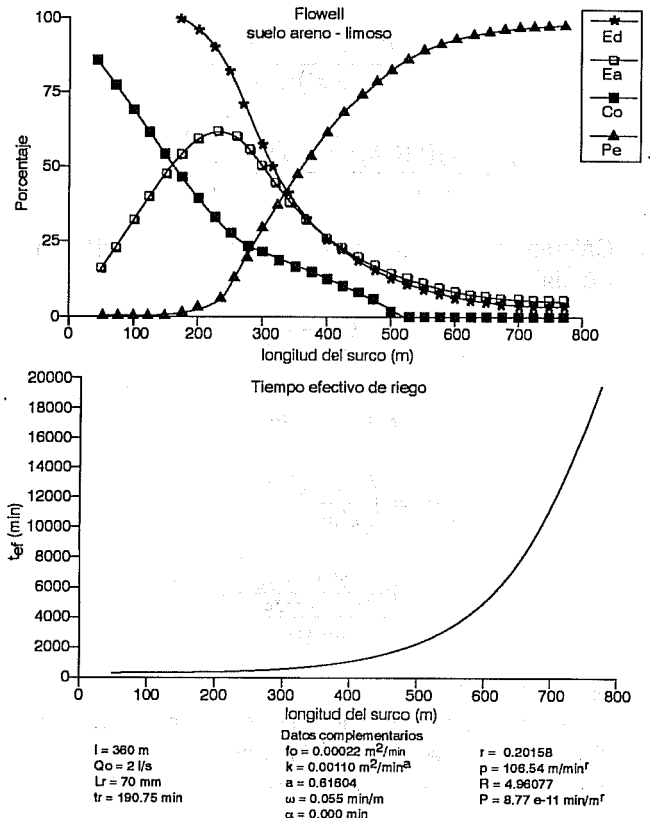
Se presentó un método basado en el principio de conservación de masa, por medio del cual es factible evaluar, a partir de datos experimentales, los coeficientes empíricos de las ecuaciones de infiltración acumulada propuestas por Kostiakov y Kostiakov-Lewis.

Se demostró que existe una sola función de solución, la cual es independiente de la longitud de surco. Este aspecto es de suma importancia, ya que

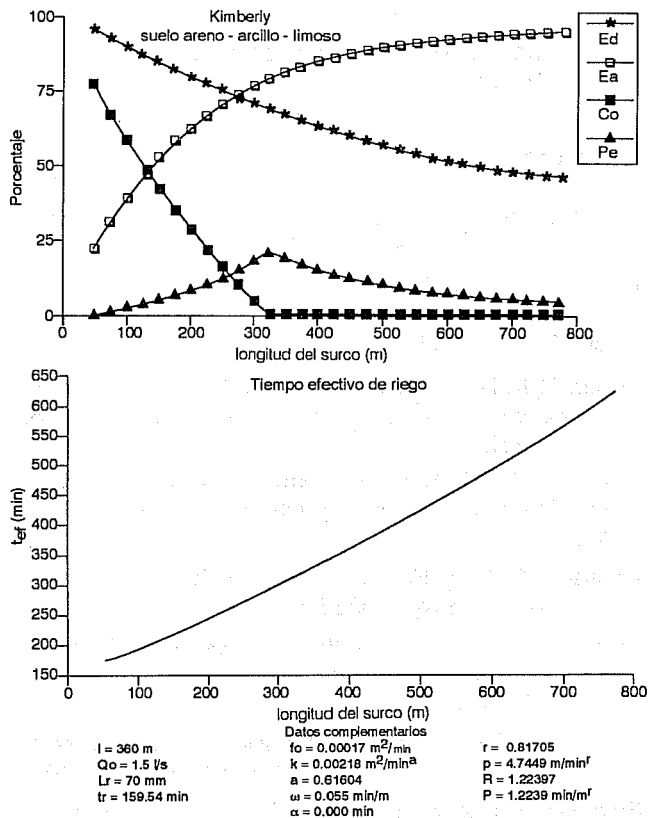
7. Gráficas para diseño



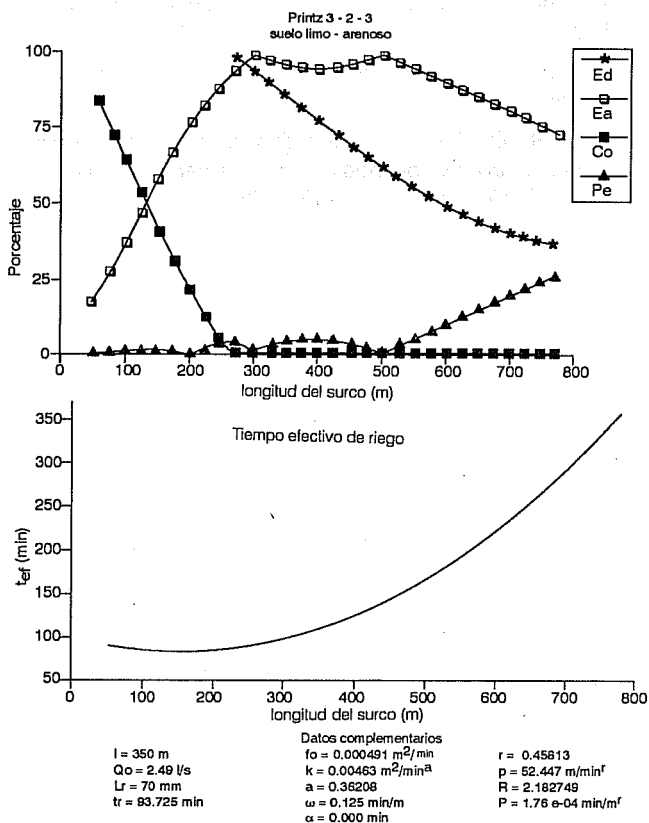
8. Gráficas para diseño



9. Gráficas para diseño



10. Gráficas para diseño



en general los métodos propuestos en la literatura especializada, también basados en el balance de volumen, generan una familia de soluciones que depende de esta longitud, lo cual no es correcto si se parte del hecho de considerar implícitamente en la deducción que el suelo tiene una textura homogénea a lo largo del surco.

Se recomienda, siempre que sea posible, obtener los datos necesarios para la aplicación del método, en surcos con una longitud superior a 100 m. Esta situación permite garantizar, con un alto grado de confiabilidad, que con los datos de campo se obtenga una correcta ecuación de avance del frente de onda, lo cual es fundamental para el cálculo de las ecuaciones de infiltración acumulada.

Se ha presentado un método sumamente útil para el diseño racional y eficiente de riego continuo en surcos.

Se demostró que es factible en ciertos casos diseñar sistemas de riego por gravedad, que operen con altas eficiencias tanto de distribución como de aplicación.

Nomenclatura

Z = volumen acumulado infiltrado por unidad de longitud de surco; $[L^3/L]$

τ = tiempo de oportunidad, tiempo efectivo que el agua permanece sobre el suelo; $[T]$

f_0 = velocidad de infiltración básica; es la magnitud constante a que tiende la velocidad de infiltración, después de un cierto tiempo de oportunidad (normalmente de 1 a 3 hrs); $[L^2T^{-1}]$.

a' = coeficiente empírico de la ecuación de infiltración acumulada (Kostiakov); $[adim]$

k' = coeficiente empírico de la ecuación de infiltración acumulada (Kostiakov); $[L^2T^{-a}]$

k = coeficiente empírico de la ecuación de infiltración acumulada (Kostiakov-Lewis); $[L^2T^{-a}]$

a = coeficiente empírico de la ecuación de infiltración acumulada (Kostiakov-Lewis); $[adim]$

l = longitud de surco; $[L]$

$t_{1/4}$ = tiempo en que el frente de onda alcanza un cuarto de la longitud total del surco; $[T]$

$t_{1/2}$ = tiempo en que el frente de onda alcanza la mitad de la longitud total del surco; $[T]$

$t_{1/3}$ = tiempo en que el frente de onda alcanza tres cuartas partes de la longitud total del surco; $[T]$

t_i = tiempo en que el frente de onda alcanza la longitud total del surco; $[T]$

t_{av} = tiempo de avance del frente de onda; $[T]$

t_{avf} = tiempo en que la onda de avance alcanza el final del surco; $[T]$

p = coeficiente empírico de la ecuación del avance del frente de onda; $[TL^{-1}]$
 r = coeficiente empírico de la ecuación del avance del frente de onda; [adim]
 s = coordenada espacial medida sobre el fondo del surco; [L]
 Δtr = incremento al tiempo de oportunidad por efecto de la recesión; [T]
 α = coeficiente empírico de la ecuación de recesión; [T]
 ω = coeficiente empírico de la ecuación de recesión; $[T/L]$
 trc = tiempo de recesión; [T]
 trc_f = tiempo en que la onda de recesión alcanza el final del surco; [T]
 Lr = lámina de riego requerida por el cultivo; $[L^3/L]$
 tr = tiempo de riego necesario para que se infiltre la lámina Lr ; [T]
 tef = tiempo efectivo de riego; [T]
 Ed = eficiencia de distribución; [%]
 Lrc = lámina de riego infiltrada en la cabecera; $[L^3/L]$
 Ea = eficiencia de aplicación; [%]
 Vi = volumen total infiltrado a lo largo del surco; $[L^3]$
 Vs = volumen total suministrado al surco; $[L^3]$
 Q_0 = gasto máximo no erosivo o gasto de alimentación suministrado al surco; $[L^3/T]$
 Q_{fs} = gasto descargado al final del surco una vez que se alcanza un estado de flujo superficial permanente; $[L^3/T]$
 Co = pérdida por coleos, en % del volumen total suministrado; [%]
 Pe = pérdida por percolación profunda, en % del volumen total suministrado; [%]

ns = número de surcos que atiende un modulo de riego.
 mr = módulo de riego que se proporciona a una parcela, $[L^3/T]$

Bibliografía

- Centro de estudios hidrográficos. *Manual de ingeniería de regadíos*, Rafael Heras (Ed.), Madrid, 1981.
- Elliot, R. L., y W. R. Walker. "Field evaluation of furrow infiltration and advance functions", *Trans. ASAE* 25(2), pp. 396-400, 1982.
- García, V. N. H. y Aguilar, Ch. A. *Diseño de riego continuo en surcos con reducción de caudal*, trabajo interno del IMTA, 1991.
- García, V. N. H. 1991. "Determinación experimental de la infiltración en surcos", publicación interna del IMTA, 1991.
- Israelsen, O. W. y Hansen, V. E. *Irrigation principles and practices*, John Wiley and Sons, Nueva York, 1981.
- Kiefer, F. W. Jr. *Average depth of absorbed water in surface irrigation*, Civil Engineering Dept. Utah State University, Logan, Utah, 1959.
- Philip, J. R. "The Influence of the initial moisture content", en *The theory of infiltration*, Soil Sci. 84: 329-337, 1957.
- Smerdon, E. T., A. W. Blair y D. L. Reddell. "Infiltration from irrigation advance data. I: Theory", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 114, núm. 1: pp. 4-17, 1988.
- Walker, W. R. y V. G. Skogerboe. *Surface Irrigation*. Ed. Prentice Hall, Nueva Jersey, 1987.
- William, R. D. "Infiltration function from furrow stream advance", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 115, núm. 4, pp. 722-730, 1989.