

Border Irrigation Method Método de riego fronterizo

Professor Vijay P. Singh, Ph.D. D.Sc., P.E., P.H. Hon. D.WRE
Distinguished Professor
Regents Professor

Caroline & William N. Lehrer Distinguished Chair in Water Engineering

Honorary Professor , Beijing Normal University, China

Honorary Professor , Sichuan University, Chengdu, China

Distinguished Visiting Professor, Indian Institute of Technology Roorkee,
India

Department of Biological and Agricultural Engineering &
Zachry Department of Civil Engineering

Franjas

- Es una franja delimitada por crestas bajas.
- Un campo dividido en franjas mediante la construcción de crestas paralelas a lo largo de la pendiente.
- Las franjas fronterizas pueden ser:
 - Borde de nivel
 - Borde graduado
- Las fronteras de nivel pueden ser:
 - Abierto:
 - Si el extremo aguas abajo está abierto, el agua se drenará libremente del borde
 - Cerrado (diqueado):
 - Está diqueado en el extremo aguas abajo que conduce a una mayor eficiencia y uniformidad.

Franjas (continuación)

- Las fronteras se construyen en terrenos de baja pendiente o nivelados o que pueden nivelarse económicamente sin reducir la productividad del campo.
- En terrenos que tienen pendiente excesiva y topografía ondulada, los bordes del terreno también se colocan a través de la pendiente longitudinal siguiendo contornos
- Los bordes del contorno tienen una pendiente longitudinal uniforme y sin pendiente transversal.
- La fuente de agua para el riego del borde suele ser una zanja o canal que fluye perpendicular a los bordes o una tubería o tubo de baja presión.
- El método de riego en la frontera es adecuado para cultivos cercanos, como trigo, cebada, legumbres y forrajes, pero no para arroz que requiere agua estancada.
- No es adecuado para suelos con tasas de ingesta muy bajas y muy altas.

Diseño de franjas

- Un diseño de borde típico, consiste en una serie de tiras que corren paralelas al límite del campo
- Fuente de agua en el extremo aguas arriba y zanja de drenaje en el extremo aguas abajo
- Los bordes de contorno dividen el campo en una serie de tiras que siguen los contornos donde cada tira se nivela en sentido transversal, formando una serie de bancos
- La diferencia de elevación entre bancos consecutivos debe limitarse a 30 cm y no debe exceder los 60 cm en ningún caso.

Diseño de franjas (continuación)

- El diseño del borde también depende del tamaño del campo, la ubicación de la fuente de agua y el largo y ancho de los bordes.
- Si un campo es pequeño y la capacidad de infiltración del suelo es baja, los bordes se extienden a lo largo de todo el campo.
- Si el campo es grande y su capacidad de infiltración del suelo es alta, entonces pueden ser necesarios dos o más bordes a través del campo.
- Es deseable tener la fuente de suministro de agua ubicada que permita que todas las fronteras sean irrigadas por gravedad.

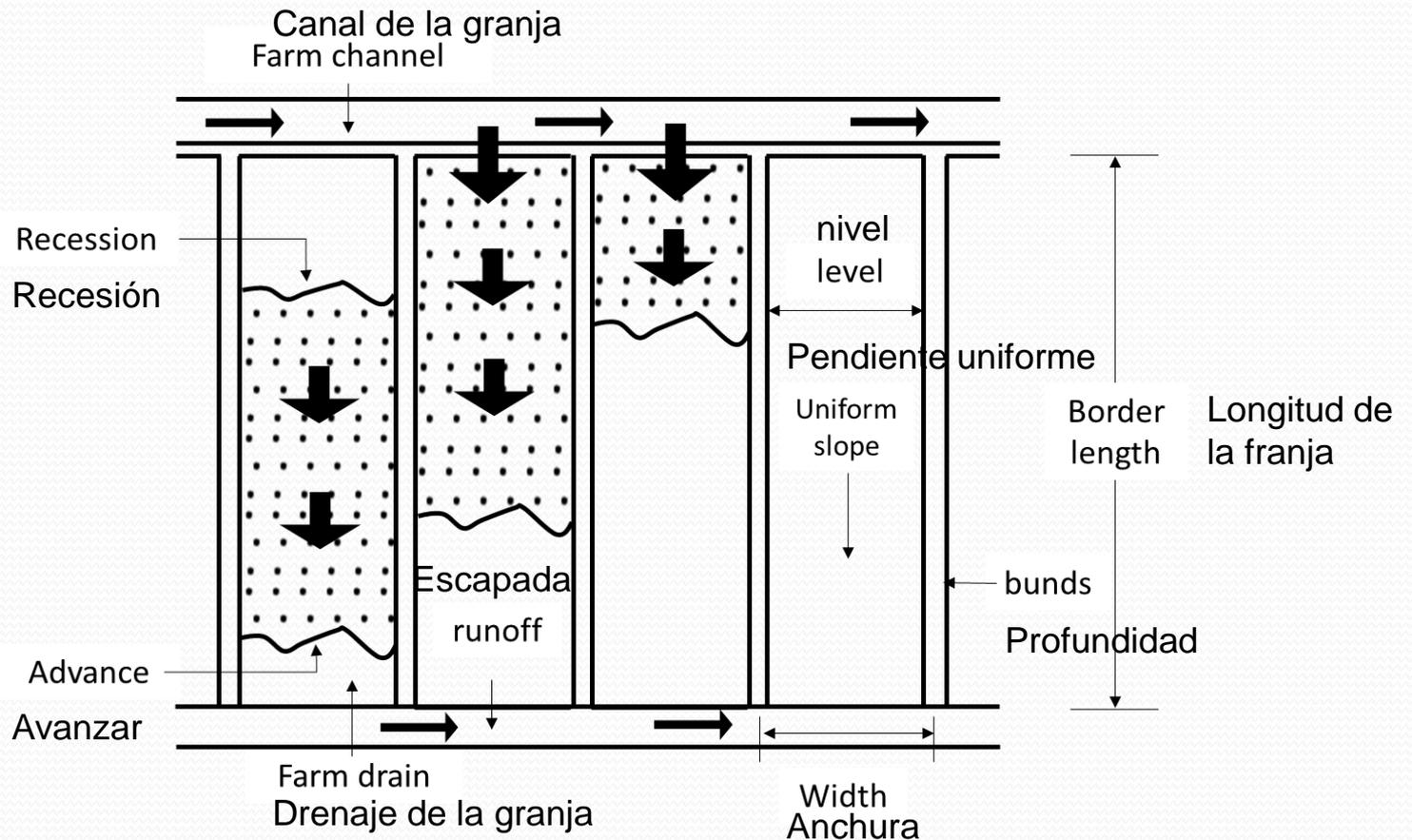


Figura 1. Diseño típico para el sistema de riego de borde gradual (Fuente: Jurriens et al. 2001)

- Los bordes de contorno dividen el campo en una serie de tiras que siguen los contornos donde cada tira se nivela en sentido transversal, formando una serie de bancos,

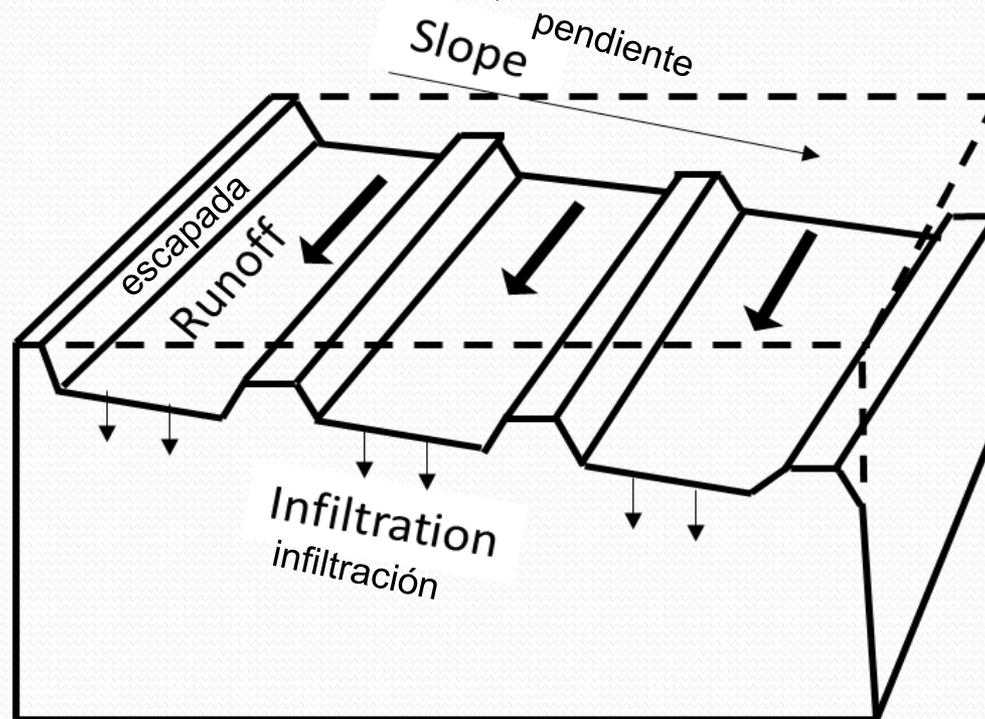


Figura 2. Riego del contorno del borde

Longitud de la franja

- Longitud de la frontera
- Depende de:
 - Tamaño del campo
 - Características del suelo
- Pendiente topográfica
- Tamaño de la corriente
- Profundidad de riego requerida
- La longitud del borde puede ser más larga en suelos pesados que en suelos ligeros, y puede ser más larga en el mismo suelo con un tamaño de arroyo más grande.
- El borde puede ser más largo en pendientes más pronunciadas, pero se deben tomar precauciones contra la erosión
- La longitud de la cuenca pequeña puede tener un mejor

Longitud de la franja (continuación)

- Booher (1974) ha informado que se puede lograr un rendimiento de riego aceptable con longitudes de borde de hasta 800 m en suelos de bajo consumo, mientras que se puede requerir una longitud de menos de 100 m en suelos de alto consumo.

Longitud de la franja (continuación)

Tabla 1. Longitudes de borde típicas para diferentes suelos (Fuente: Booher, 1974)

Típica longitud de franja

Soil suelo	Typical border length	
	(m)	(ft)
Clay arcilla	180-350	600-1150
Clay loam Arcilla franca	90-300	300-1000
Sandy loam Marga arenosa	90-250	300-800
Loamy sand Arena arcillosa	75-150	250-500
Sand Arena	60-90	200-300

Longitud de franja (continuación)

Tabla 2. Dimensiones típicas de la franja fronteriza en metros en relación con el tipo de suelo, la pendiente, la profundidad de riego y el tamaño del arroyo (Fuente: Savva y Frenken 2002)

Soil type	Slope (%)	Depth applied (mm)	Flow (l/sec)	Strip width (m)	Strip length (m)
Coarse	0.25	50	240	15	150
		100	210	15	250
		150	180	15	400
	1.00	50	80	12	100
		100	70	12	150
		150	70	12	250
	2.00	50	35	10	60
		100	30	10	100
		150	30	10	200
Medium	0.25	50	210	15	250
		100	180	15	400
		150	100	15	400
	1.00	50	70	12	150
		100	70	12	300
		150	70	12	400
	2.00	50	30	10	100
		100	30	10	200
		150	30	10	300
Fine	0.25	50	120	15	400
		100	70	15	400
		150	40	15	400
	1.00	50	70	12	400
		100	35	12	400
		150	20	12	400
	2.00	50	30	10	320
		100	30	10	400
		150	20	10	400

Savva y Frenken (2002) han presentado longitudes de borde típicas, como se muestra en las Tablas 15.2 y 15.3, para granjas pequeñas y grandes, respectivamente.

Longitud de la franja (continuación)

Savva y Frenken (2002) han presentado longitudes de borde típicas, como se muestra en las Tablas 15.2 y 15.3, para granjas pequeñas y grandes, respectivamente.

Tabla 3. Anchuras y longitud máximas de borde sugeridas para esquemas de riego de pequeños propietarios (Fuente: Savva y Frenken 2002)

[El flujo se da por metro de ancho del borde. El flujo total hacia un borde es igual al flujo unitario multiplicado por el ancho del borde en metros.]

Soil type	Border strip slope (%)	Unit flow per meter width (l/sec)	Border strip width (m)	Border strip length (m)
Sand (infiltration greater than 25 mm/h)	0.2-0.4	10-15	12-30	60-90
	0.4-0.6	8-10	9-12	80-90
	0.6-1.0	5-8	6-9	75
Loam (infiltration of 10 to 25 mm/h)	0.2-0.4	5-7	12-30	90-250
	0.4-0.6	4-6	9-12	90-180
	0.6-1.0	2-4	6	90
Clay (infiltration less than 10 mm/h)	0.2-0.4	3-4	12-30	180-300
	0.4-0.6	2-3	6-12	90-180
	0.6-1.0	1-2	6	90

Ancho del borde (continuación)

- Booher (1974) ha recomendado que la diferencia en las elevaciones de las crestas de un borde no debe exceder los 3 cm (1 pulg.) O la diferencia entre las elevaciones de la superficie del suelo de los lados cuesta arriba y cuesta abajo de una cresta no debe exceder los 6 cm (2 pulg.)
- Por lo tanto, el ancho del borde no debe exceder los 9 m (30 pies) en una pendiente transversal de 1.0 por ciento ($9 \text{ cm} / 0.01 = 9 \text{ m}$).
- Alternativamente, todo el campo se puede clasificar a una pendiente uniforme del 1 por ciento y el ancho máximo será de $3 \text{ cm} / 0.01 = 3 \text{ m}$. Para pendiente de campo cero y pendiente transversal de 1 por ciento, el ancho puede ser de $6 \text{ cm} / 0.01 = 6 \text{ m}$ (20 pies).

Ancho de la franja o borde

- El ancho de un borde también depende del tamaño del arroyo y la declinación de la tierra y puede ser de 3 a 30 m.
- Para tamaños de arroyo pequeños, el ancho puede ser menor pero no inferior a 3 m en ningún caso. El ancho no debe ser mayor de 9 m en pendientes transversales del 1% (James, 1988).
- Si se usa maquinaria para el cultivo, entonces el ancho debe ser suficiente para permitir una pasada. Sin embargo, el ancho debe ser suficiente para permitir un número par de pasadas.

Ancho del borde o franja

- Los valores del ancho máximo del borde, dependiendo de la pendiente, han sido dados por el Servicio de Conservación del Suelo (1974), como se muestra en la Tabla 15.4.

Tabla 15.4 Anchuras máximas de borde recomendadas para diferentes pendientes en la dirección de la pendiente (Fuente: Servicio de Conservación del Suelo, 1974)

Slope (%)	Maximum border width	
	(m)	(ft)
Level	60	200
0.0-0.1	35	120
0.1-0.5	20	60
0.5-1.0	15	50
1.0-2.0	12	40
2.0-4.0	9	30
4.0-6.0	6	20

Pendiente de la franja o borde

- Tres cuestiones deben considerarse en la pendiente.
- (1) Las fronteras deben tener suficiente pendiente para permitir que el agua fluya aguas abajo sobre la superficie.
- (2) Debería permitir que algo de agua se infiltre en el suelo, pero evitar la filtración profunda en el extremo aguas arriba.
- (3) La velocidad del flujo no debe ser grande para causar una erosión significativa del suelo.

Pendiente de la franja o borde

- La pendiente máxima depende del potencial de erosión del suelo.
- Savva y Frenken (2002) sugieren una pendiente mínima de 0.05-0.1% necesaria para que el agua fluya río abajo sobre la frontera.
- La pendiente del suelo es generalmente mayor en suelos de textura gruesa (0.25 a 0.6% para arena) que en suelos de textura fina (0.05 a 0.20% para arcilla, 0.20% - 0.40% para margas) (Michael, 1978).

Pendiente de la franja o borde

- La pendiente más grande se puede usar en condiciones de césped que en condiciones de cobertura sin césped.
- Con el fin de mejorar la uniformidad de la aplicación del riego en la frontera, puede ser necesario suavizar la tierra para eliminar surcos o depresión que concentran el flujo.
- Puede ser necesario ajustar las pendientes para mejorar la eficiencia del riego.
- Booher (1974) recomendó pendientes mínimas de 0.2 a 0.3 por ciento y pendientes máximas de 2 por ciento para margas arenosas y hasta 7 por ciento para suelos arcillosos pasturados con agregados estables al agua.

Crestas fronterizas

- Crestas:
- El ancho y la altura superiores de la cresta del borde deben ser aproximadamente iguales
- La altura debe ser suficiente para acomodar la máxima profundidad de flujo.
- Se debe proporcionar un francobordo de unos 2,5 cm.
- La pendiente lateral no debe ser mayor que 2.5: 1 para suelos cohesivos y 3: 1 para suelos no cohesivos
- La profundidad máxima de flujo se puede determinar utilizando la ecuación de Manning como:

$$(15.1) \quad y_{\max} = \left(\frac{Q_{\max} n}{60 S_0^{0.5}} \right)^{3/5}$$

donde y_{\max} = profundidad de flujo máxima en la entrada del borde (m)

Crestas fronterizas

- La profundidad de flujo, d , en el extremo aguas arriba de un borde también se puede obtener como $d =$

$$K_1 T_L^{\frac{3}{16}} Q^{\frac{9}{16}} n^{\frac{3}{8}} \quad \text{for } S_o \leq 0.4\% \quad (15.2)$$

$$d = K_2 Q^{0.6} n^{0.6} S_o^{-0.3} \quad \text{for } S_o > 0.4\% \quad (15.3)$$

d es la profundidad de flujo normal en el extremo aguas arriba del borde (mm, pulg.);

T_L es el tiempo de retraso (minutos); Q es el tamaño de la corriente ($m^3 / s / m$, $ft^3 / s / ft$);

n es el factor de rugosidad de manning; S_o es la pendiente del borde (m / m , $ft./ft.$);

K_1 es la unidad constante igual a 2454 para Q en $m^3 / s / m$ y d en mm, e igual a 25.4 para Q en $ft^3 / s / ft$ y d en in.;

K_2 es la unidad constante igual a 1000 para Q en $m^3 / s / m$ y d en mm, e igual a 9.46 para Q en $ft^3 / s / ft$ y d en in.

Número de bordes y número de conjuntos

- Se puede determinar seleccionando la tasa de entrada de la unidad (tasa de flujo por unidad de ancho del borde) que está en el rango de las tasas de entrada máxima y mínima
- El ancho establecido que contiene un número par de bordes de ancho satisfactorio para facilitar otras operaciones agrícolas puede calcularse como:

$$(15.4) \quad W_b = \frac{Q}{Q_0}$$

donde Q = suministro total de agua (m^3 / min)

Q_0 = tasa de entrada de la unidad ($m^3 / \text{min} / m$)

W = ancho de campo (m)

W_b = ancho del conjunto de bordes (m) que contiene un número par de bordes de ancho satisfactorio.

El número entero de conjuntos (N_b) se puede obtener como

$$(15.5)$$

$$N_b = \frac{W}{W_b}$$

Suministro de agua

- Entrega de agua:
- El agua se entrega desde la fuente de suministro al campo a través de
 - Canal abierto
 - Una tubería de baja presión.
- Para una granja, el sistema de entrega debe tener la capacidad suficiente para satisfacer la demanda de riego en todas partes de la granja
- El sistema de suministro de agua está diseñado con el conocimiento de:
 - Tasa de entrada
 - Longitud del borde
 - Pendiente de la frontera
- Número de bordes por juego (ancho del juego)

Tiempo de corte (tiempo de entrada)

- Un evento de riego de borde se define por la duración dentro de la cual ocurre la profundidad de riego deseada al final del borde
- Una cantidad sustancial de almacenamiento en la superficie permanece en el borde en el momento en que se corta la entrada
- Esta agua se infiltra y sale de la frontera durante las fases de agotamiento y recesión.
- El tiempo de recesión al final de la frontera es igual a la suma del tiempo de avance y el tiempo de oportunidad de admisión
- Conociendo el tiempo de recesión, el tiempo de agotamiento y el tiempo de corte deben calcularse para cada tasa de entrada elegida

Tamaño de la corriente de riego

- La velocidad de entrada y el límite de tiempo son variables de diseño clave en el riego de bordes y ofrecen la máxima flexibilidad en el proceso de diseño.
- El tamaño de la corriente debe ser tal que el agua se extienda adecuadamente a lo ancho del borde y debe llegar al final del borde.
- El Servicio de Conservación de Suelos (USDA, 1974) proporcionó las siguientes pautas para seleccionar la tasa máxima de entrada no erosiva (Q_{\max}) y la tasa mínima de entrada (Q_{\min}). Q_{\max} para cultivos que no forman césped (alfalfa y grano pequeño) se puede obtener como:

$$Q_{\max} = 0.01059S_0^{-0.75} \quad (15.8)$$

donde Q_{\max} está en $m^3 / \text{min} / m$ y S_0 en m / m .

Para cultivos densos que forman césped, el valor de Q_{\max} puede ser el doble que el obtenido de la ecuación (4).

Tamaño de la corriente de riego

- El valor de Q_{\min} se puede obtener como:

$$(15.9) \quad Q_{\min} = \frac{0.000357LS_0^{0.5}}{n}$$

donde Q_{\min} está en $m^3 / \text{min} / \text{my}$ S_0 en m / m

El tamaño del flujo debe estar dentro del rango de velocidades de entrada mínimas y máximas que resulten en la máxima eficiencia de la aplicación.

Diseño simplificado de riego fronterizo

- Siguiendo a Walker y Skogerboe (1987), se supone que el perfil del agua superficial en el momento del corte del flujo de entrada (TCO) y que al final del agotamiento (t_d), que también es el comienzo de la recesión (t_r), son líneas rectas con puntos finales correspondientes a condiciones de flujo uniformes, como se muestra en la Figura 15.3.
- Además, la profundidad en el extremo aguas abajo (y_L) permanece constante y la escorrentía (Q_r) ocurre a una velocidad constante durante la fase de agotamiento. Durante las fases de agotamiento y recesión, la suma de infiltración (I) y escorrentía (Q_r) es igual a la tasa de entrada de la unidad de precorte (Q_0).

Diseño simplificado de riego fronterizo

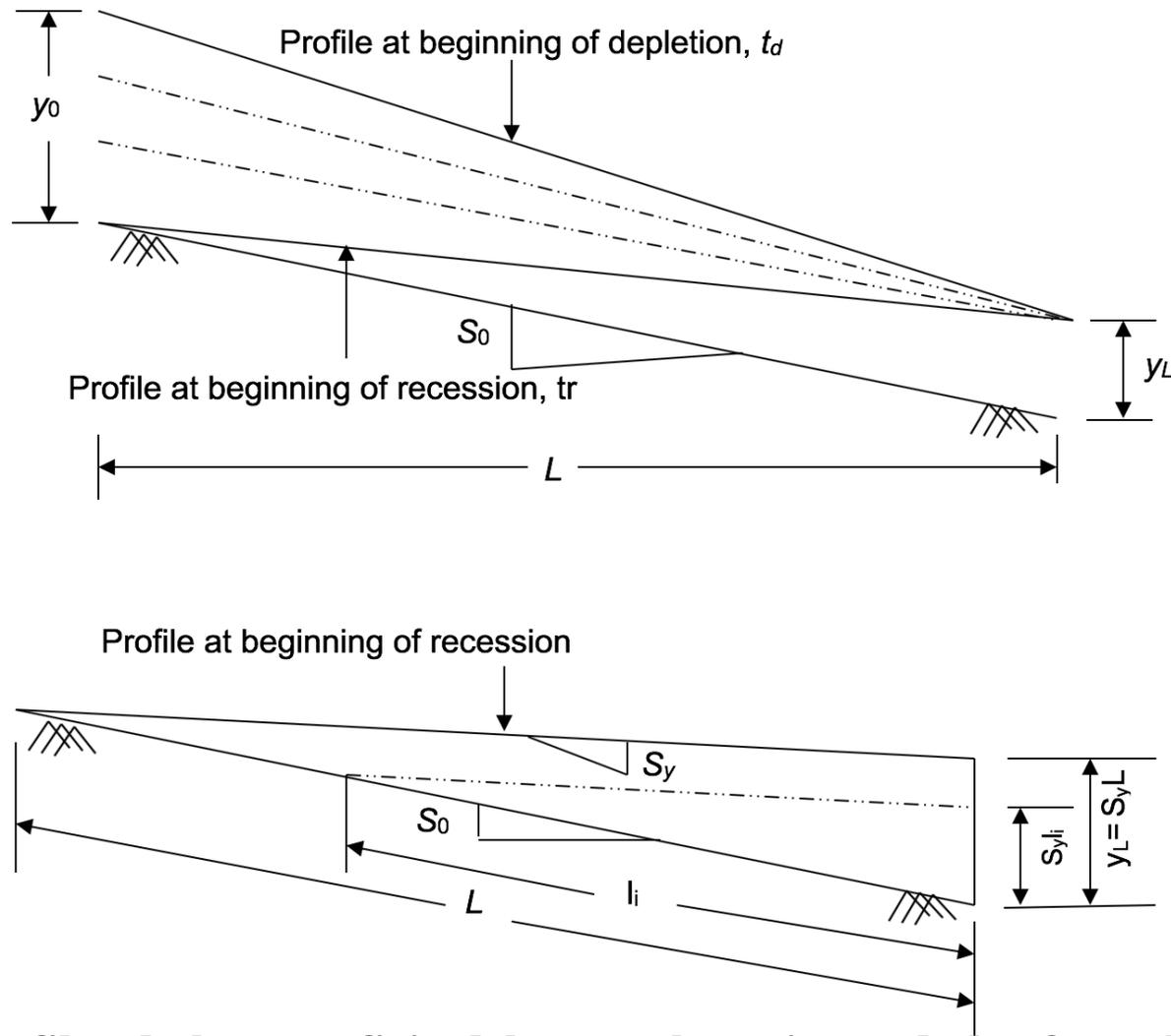


Figura 15.3 Perfiles de la superficie del agua al comienzo de las fases de agotamiento y

Diseño simplificado de riego fronterizo

- En la figura 15.3, se ve que el tiempo requerido desde el corte del flujo de entrada hasta el final de la fase de agotamiento (es decir, cuando la profundidad aguas arriba se convierte en cero) es igual al tiempo requerido para eliminar el volumen de agua definido por el triángulo de longitud L y altura y_0 a una tasa constante de Q_0 a través de infiltración y escorrentía. Esto se puede expresar como:

$$t_d = T_{CO} + \frac{y_0 L}{Q_0} \quad (15.13)$$

Diseño simplificado de riego fronterizo (cont.)

- Al comienzo de la recesión, se supone que la profundidad del flujo cambia con la distancia a una velocidad uniforme en toda la longitud del borde y su pendiente se puede expresar como:
$$S_y = \frac{y_L t_d}{L} \quad (15.14)$$
- donde y_L es una función de Q_r en el tiempo t_d que se puede determinar como:

- $$Q_r(t_d) = Q_0 - I \times L = A \frac{R^{\frac{2}{3}} S_0^{\frac{1}{2}}}{n} \quad (15.15)$$

- donde A es el área de la sección transversal por unidad de ancho, y R es el radio hidráulico igual a A / WP , WP = el perímetro mojado, e I es la tasa de infiltración promedio (m / seg) sobre la longitud, L . Para bordes , $A = y$, y $WP = 1$ y, por lo tanto, $R = y$ o $S_y L$.

Diseño simplificado de riego fronterizo (cont.)

- Por lo tanto, con el uso de la ecuación (15.15), la ecuación (15.14) se

convierte en
$$S_y = \frac{1}{L} \left[\frac{(Q_0 - I \times L) \times n}{60 \times S_0^{\frac{1}{2}}} \right]^{\frac{3}{5}}$$

(15.16)

- donde se puede suponer como el valor promedio de la tasa de infiltración en el extremo aguas arriba [I (td)] y que en el extremo aguas abajo I (td-tL):
- $$I = \frac{ak}{2} [t_d^{a-1} + (t_d - t_L)^{a-1}] + f_0$$
- (15.17)

- en el que f_0 es la tasa de infiltración constante, y a y k son parámetros de la ecuación de infiltración de Kostiakov.
- El tiempo de recesión puede determinarse mediante la ecuación dada por Walker y Skogerboe (1987) como:

- $$t_r = t_d + \frac{0.095n^{0.47565} S_y^{0.20735} L^{0.6829}}{I^{0.52435} S_0^{0.237825}}$$

(15.18)

Diseño simplificado de riego fronterizo (cont.)

- Ahora se puede describir un procedimiento de diseño paso a paso para bordes drenados libremente de la siguiente manera (Walker y Skogerboe, 1987):
 - [1] Obtenga información sobre las características del campo, el suelo, el cultivo y el suministro de agua.
 - [2] Determine los valores máximo ($Q_{\text{máx}}$) y mínimo ($Q_{\text{mín}}$) de la tasa de entrada unitaria Q_0 ($\text{m}^3 / \text{min} / \text{m}$) utilizando las ecuaciones (15.8) y (15.9), respectivamente. El flujo debe estar limitado dentro de la velocidad no erosiva con suficiente profundidad para extenderse lateralmente.
 - [3] Seleccione el caudal unitario (Q_0) entre Q_{max} y Q_{min} , lo que da como resultado un ancho de conjunto que comprende un número par de bordes de ancho satisfactorio y un número entero de conjuntos utilizando las ecuaciones (15.4) y (15.5),

Diseño simplificado de riego fronterizo (cont.)

[4] Determine la profundidad de entrada en la entrada y_0 (m) usando la ecuación (15.1).

[5] Calcule el tiempo requerido (τ_{req}) en minutos para satisfacer el requisito de riego.

[6] Calcule el tiempo de avance hasta el final del borde t_L (minutos).

[7] Calcule el tiempo de recesión (t_r) en minutos desde el comienzo del riego, suponiendo que el diseño cumpla con los requisitos de riego al final de la frontera:

$$t_r = \tau_{req} + t_L \quad (15.19)$$

Diseño simplificado de riego fronterizo (cont.)

[8] Calcule el tiempo de agotamiento, t_d (minutos) numéricamente, digamos usando el método Newton-Raphson, de la siguiente manera:

a. Suponga una suposición inicial de t_d como $t_d^i = t_r$.

si. Determine la infiltración promedio (I) sustituyendo $t_d = t_d^i$ en la ecuación (15.17).

do. Determine S_y usando la ecuación (15.16).

re. Determine un nuevo valor de t_d como t_d^{i+1} usando la ecuación

(15.18) de la siguiente manera:

$$t_d^{i+1} = t_r - \frac{0.095 n^{0.47565} S_y^{0.20735} L^{0.6829}}{I^{0.52435} S_0^{0.237825}}$$

(15.20)

- e. Compare la suposición inicial (t_d^i) con el nuevo valor calculado (t_d^{i+1}). Si ambos valores son iguales, entonces t_d es el valor correcto y continúe con el paso 9. De lo contrario, establezca $t_d^i = t_d^{i+1}$ y repita los pasos b hasta e.

Diseño simplificado de riego fronterizo (cont.)

[9] Determine la profundidad infiltrada en la entrada del borde (Z_0) y compárela con Z_{req} para determinar el estado del riego (riego completo: $Z_0 \geq Z_{req}$; riego deficitario $Z_0 < Z_{req}$):

$$Z_0 = kt_d^a + f_0 t_d \quad (15.21)$$

[10] Si el riego está completo, determine T_{co} y E_a de la siguiente manera: $T_{CO} = t_d - \frac{y_0 L}{2Q_0}$

$$(15.22)$$

$$E_a = \frac{Q_{req} L}{Q_0 T_{CO}} \quad (15.23)$$

Diseño simplificado de riego fronterizo (cont.)

[11] En el caso de riego deficitario, aumente el tiempo de corte y calcule el nuevo valor t_r de la siguiente manera:

a. Calcule el nuevo T_{co} sustituyendo en lugar de t_d en la ecuación (15.13).

si. Calcule la infiltración promedio (I) sustituyendo $t_d = \tau_{req}$ en la ecuación (15.17)

do. Calcular S_y usando la ecuación (15.16)

re. Calcule t_r sustituyendo en la ecuación (15.17)

Diseño simplificado de riego fronterizo (cont.)

e. Calcule Z_L :

$$Z_L = k(t_r - t_L)^a + f_0(t_r - t_L) \quad (15.24)$$

f. Compute E_a

$$E_a = \frac{Z_{req}L}{Q_0 T_{co}} \quad (15.25)$$

[12] Verifique si la disponibilidad de agua está satisfecha y repita los pasos 4 a 12 para otras tasas de entrada de la unidad. Elija el diseño que da el valor máximo de E_a .

THANK YOU
Gracias