

Surface Irrigation Modeling

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, Beijing, 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

Riego de superficie

- El riego por superficie es el método de riego más antiguo y más utilizado en el mundo.
- Más del 90% de la tierra irrigada en el mundo, que es aproximadamente el 16% de la tierra cultivable total, se riega por irrigación de superficie.
- En los Estados Unidos, alrededor del 40% de la tierra es regada por riego de superficie.

Riego de superficie

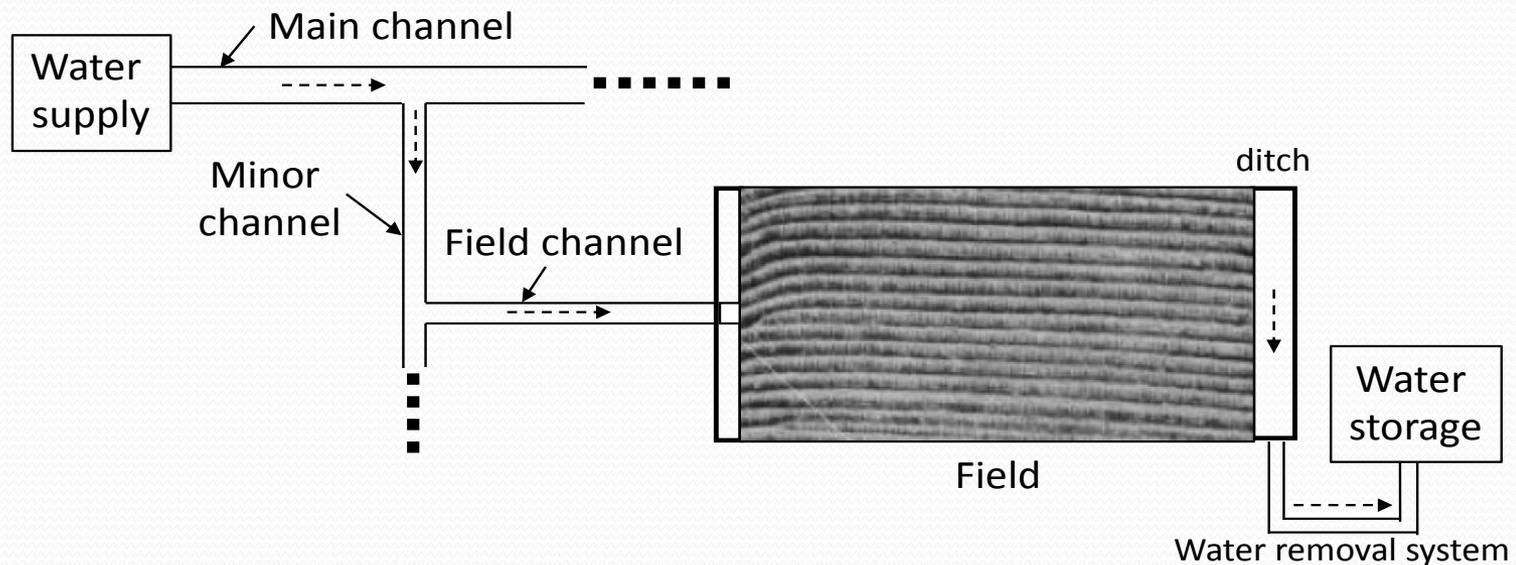
- Ventajas del riego de superficie
 - Bajo gasto en energía
 - Inversión de capital mínimo
 - Equipo simple
-
- Desventajas del riego superficial.
 - Gran aporte laboral
 - Gran tamaño de flujo
 - Nivelación de la tierra
 - Baja eficiencia

Riego de superficie

- Métodos de riego superficial.
- Riego de borde
- Riego de cuenca
- Difusión de agua
- Riego por surcos
- Riego de zanjas de contorno

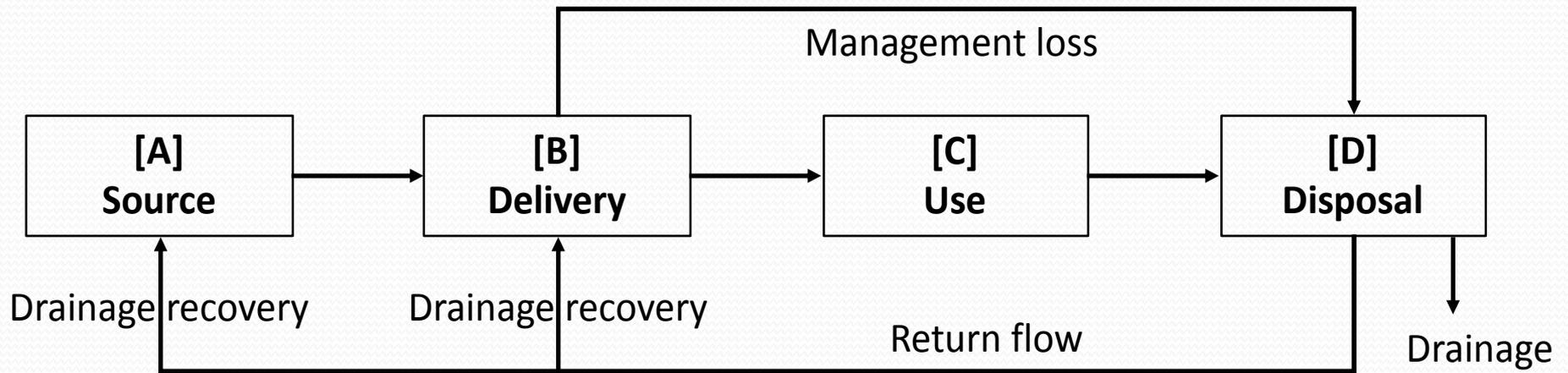
Riego: sistema físico

- El sistema físico se compone de cuatro subsistemas;
- (1) subsistema de suministro de agua, (2) subsistema de suministro de agua,
- (3) subsistema de uso de agua y (4) eliminación y reciclaje de agua
- subsistema.
- El sistema también puede tener dispositivos de medición y desvíos.



Components of a typical irrigation system

Riego: sistema físico(Contd.)

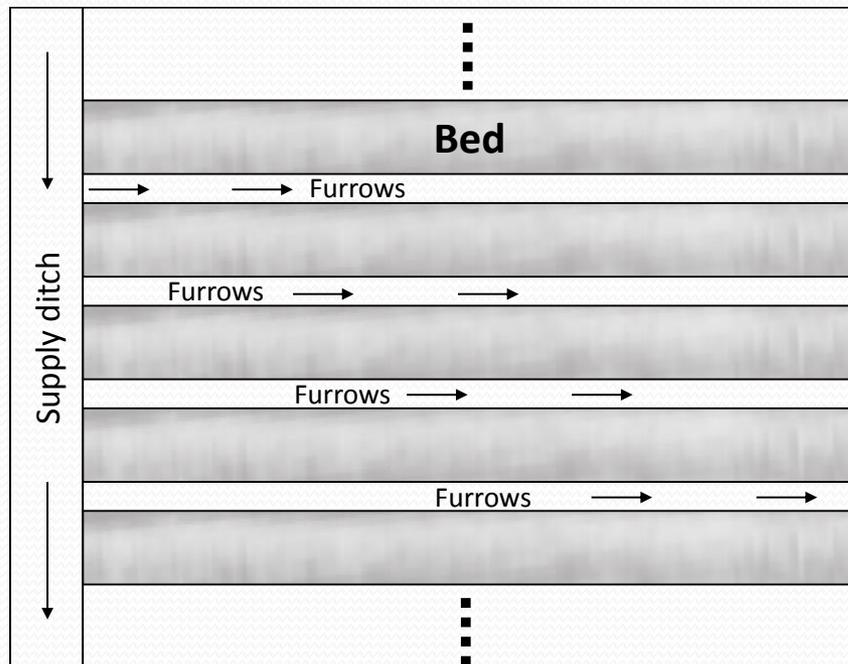


- [A] Storage dam, Open wells
- [B] Primary canals, Distributed storage
- [C] Farm ponds, Irrigated field
- [D] Primary drains, Evaporation ponds

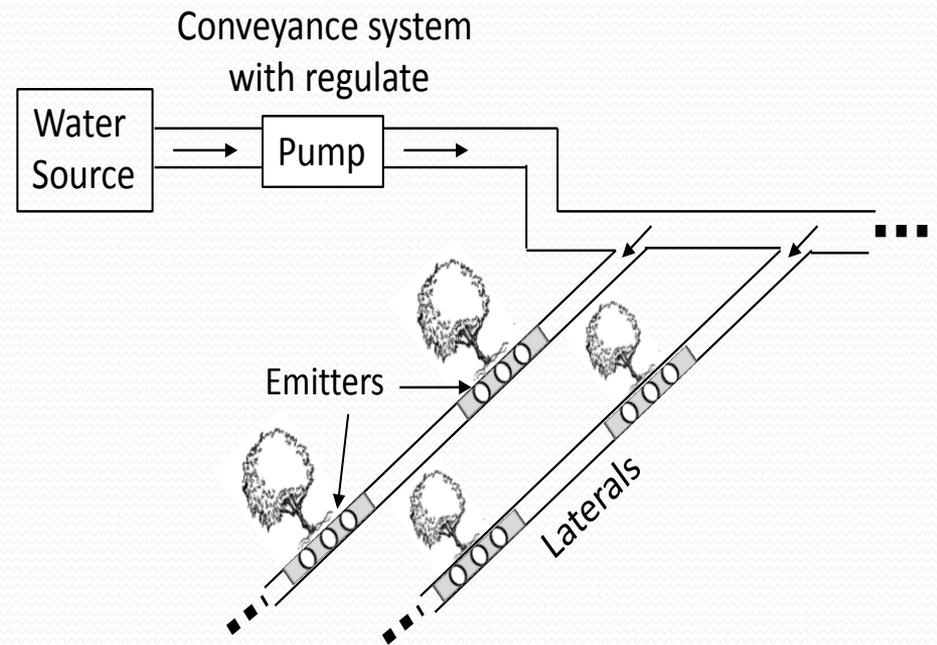
Different subsystems and their interconnections

Métodos de riego

- Existen cuatro métodos básicos de aplicación de agua para riego: (1) superficie, (2) rociador, (3) goteo y (4) debajo de la superficie.



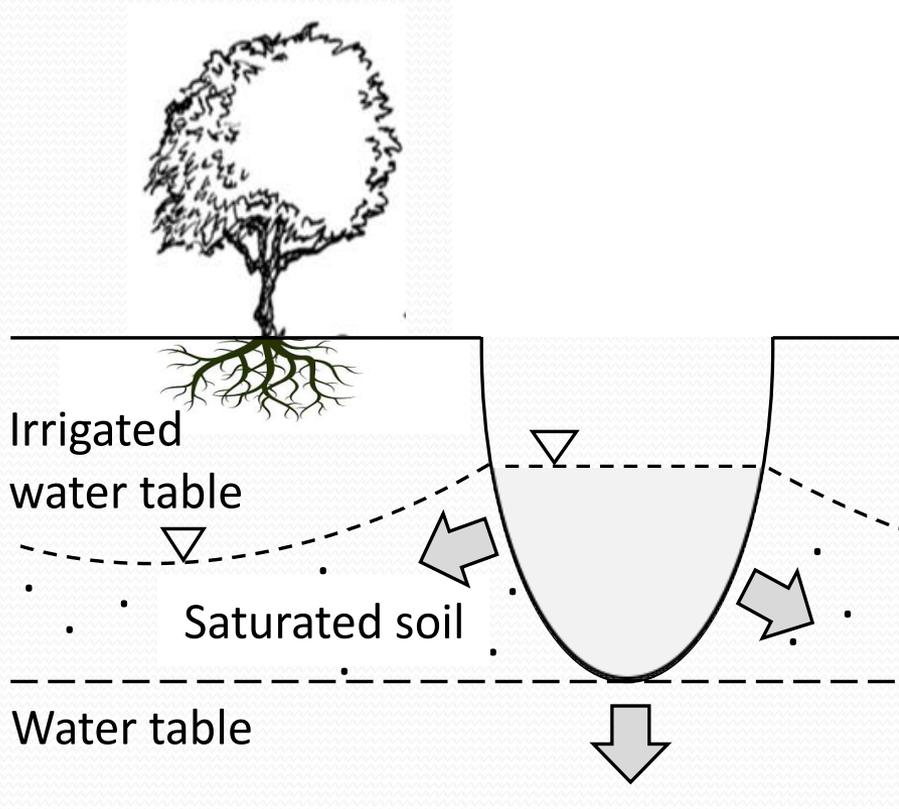
Furrow irrigation



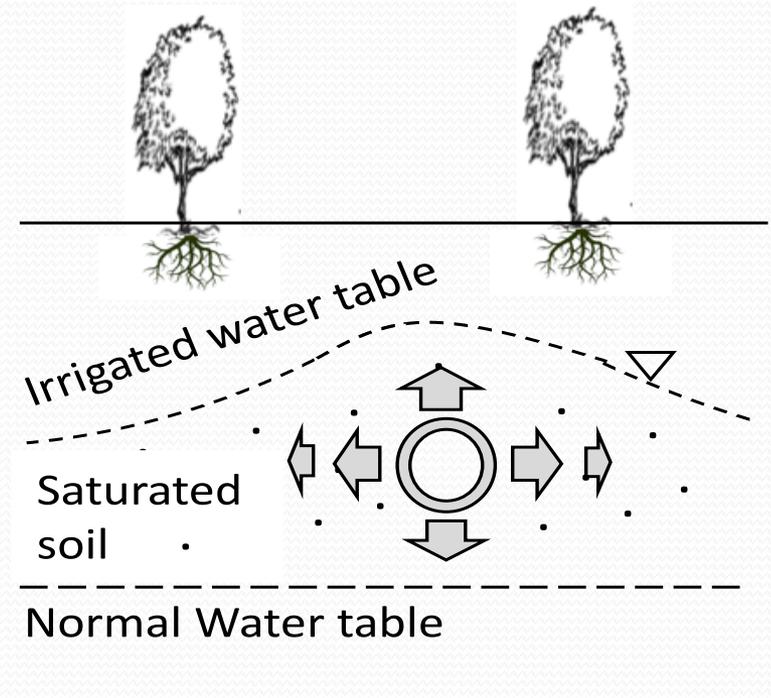
Trickle method of irrigation>

Métodos de riego(CONT)

- El método de subirrigación suministra agua a la zona radicular al regular artificialmente la elevación de la capa freática.
-



Sub-irrigation by open-ditch method



Sub-irrigation by underground perforated pipe method

Metodo de Riego de superficie

- Algunos métodos de riego pueden clasificarse según la pendiente del terreno, porque algunos métodos están diseñados para terrenos nivelados y otros para terrenos con cierta pendiente.
- (1) Sistema de niveles: este tipo de sistema es muy popular en países en desarrollo como India, donde las tierras son muy pequeñas
- (2) Sistema graduado: los sistemas graduados se pueden clasificar como borde graduado, zanja de contorno, surco graduado, corrugación y surco de contorno.

Elección de un método de riego



372/5000

- 1. Factores naturales (clima, textura del suelo, capacidad del agua, pendiente)
- 2. Tipo de cultivo (tolerancia al agua)
- 3. Tipo de tecnología (equipo, mantenimiento)
- 4. Práctica de riego (tradición de riego, decisión del agricultor)
- 5. Trabajo (conocimientos técnicos)
- 6. Costo y beneficio (costo laboral, costo operativo)
- 7. Selección de un método de riego de superficie (tipo de sistema, forma de campo)

VARIABLES DE DECISIÓN DE RIEGO DE SUPERFICIE

- Objetivo:
- Aplique la profundidad de riego requerida para reponer el agotamiento de la humedad del suelo en la zona de la raíz del cultivo de manera uniforme en todo el campo mientras minimiza la pérdida de agua debido a la filtración profunda y la escorrentía.
- Es muy difícil aplicar agua de manera uniforme con una alta eficiencia de aplicación, porque una serie de factores (parámetros y variables) afectan el rendimiento del riego de superficie.
- Parámetros de riego.
- Factores que no cambian durante el evento de riego ni durante la temporada.
- Variables de riego
- Pueden cambiar durante un evento de riego y también en la temporada.

VARIABLES DE DECISIÓN DE RIEGO DE SUPERFICIE

Los factores y variables se pueden agrupar en tres grandes categorías:

Geometría de campo

Condiciones de campo

VARIABLES DE GESTIÓN

(1) Geometría de campo

Se puede definir por la longitud, el ancho, la pendiente y la forma del surco

A menudo es fijo, lo que limita la longitud de los surcos, la cuenca o los bordes.

En algunos casos, la longitud puede considerarse como una variable de diseño

El ancho de la cuenca y los bordes a menudo está dictado por el ancho de la maquinaria.

El espacio entre surcos depende de consideraciones agronómicas y la forma del surco depende del equipo agrícola disponible y las prácticas locales

Variables de decisión de riego de superficie

- (2) condiciones de campo
- La resistencia al flujo generalmente se considera utilizando el coeficiente de rugosidad de Manning (n).
- Las características de rugosidad varían no solo en el espacio sino que también varían durante la temporada.
- La rugosidad está influenciada por el crecimiento de la vegetación, el sellado de la superficie, la operación de labranza y la geometría del flujo.
- Para el diseño del riego por surcos, generalmente se usa un valor n de 0.04.

Tabla 1. Valores recomendados de Manning n para el diseño de sistemas de riego de superficie (de Jurriens et al. 2001)

n value	Field conditions	Irrigation Methods
0.04	Superficie del suelo lisa y desnuda; cultivos en hileras	Surco, cuenca y borde
0.10	Cultivos de grano pequeño perforados, hileras de perforación en la dirección del flujo	Corrugación, cuenca y borde
0.15	Alfalfa, menta, difusión de granos pequeños	Cuenca y borde
0.20	Alfalfa densa o alfalfa en campos largos sin zanjas secundarias	Cuenca y borde
0.25	Densos cultivos de césped y granos pequeños, perforados perpendiculares a la dirección del	Cuenca y borde

VARIABLES DE DECISIÓN DE RIEGO DE SUPERFICIE

La infiltración controla el avance, la infiltración, la escorrentía y la recesión y, por lo tanto, afecta el rendimiento del riego de superficie y es una variable de diseño básica.

Los sistemas de riego deben diseñarse con características de infiltración representativas en el campo.

Se han desarrollado varias ecuaciones de infiltración como:

La ecuación de Kostiakov:

$$Z = k\tau^a$$

(1)

- The modified Kostiakov (Kostiakov-Lewis) equation: $Z = k\tau^a + j_c\tau^c$ (2)

where Z = cumulative infiltration volume ($\text{m}^3/\text{unit area}$)

k = parameter (m/min^a)

a = fitted parameters, τ is the intake opportunity time (min)

- Tabla 2. Parámetros de infiltración de Kostiakov-Lewis en función del número de ingesta de suelo NRCS para riegos primero y más tarde (de Walker, 2003; Manual SIRMOD-III) {Tabla completa en las notas}

NRCS Intake No	Soil Type	k (m ³ /min ^a)		a		f_c (m ³ /m/m/min)	
		First Irrigation	Later Irrigations	First Irrigation	Later Irrigations	First Irrigation	Later Irrigations
.01	Heavy Clay	.0044	.0044	.200	.200	.000011	.000011
.05	Clay	.0043	.0043	.258	.258	.000022	.000022
.10	Clay	.0038	.0038	.317	.316	.000035	.000035
.15	Light clay	.0036	.0036	.257	.255	.000046	.000046
.20	Clay Loam	.0035	.0034	.388	.385	.000057	.000057
.25	Clay Loam	.0034	.0033	.415	.411	.000068	.000067

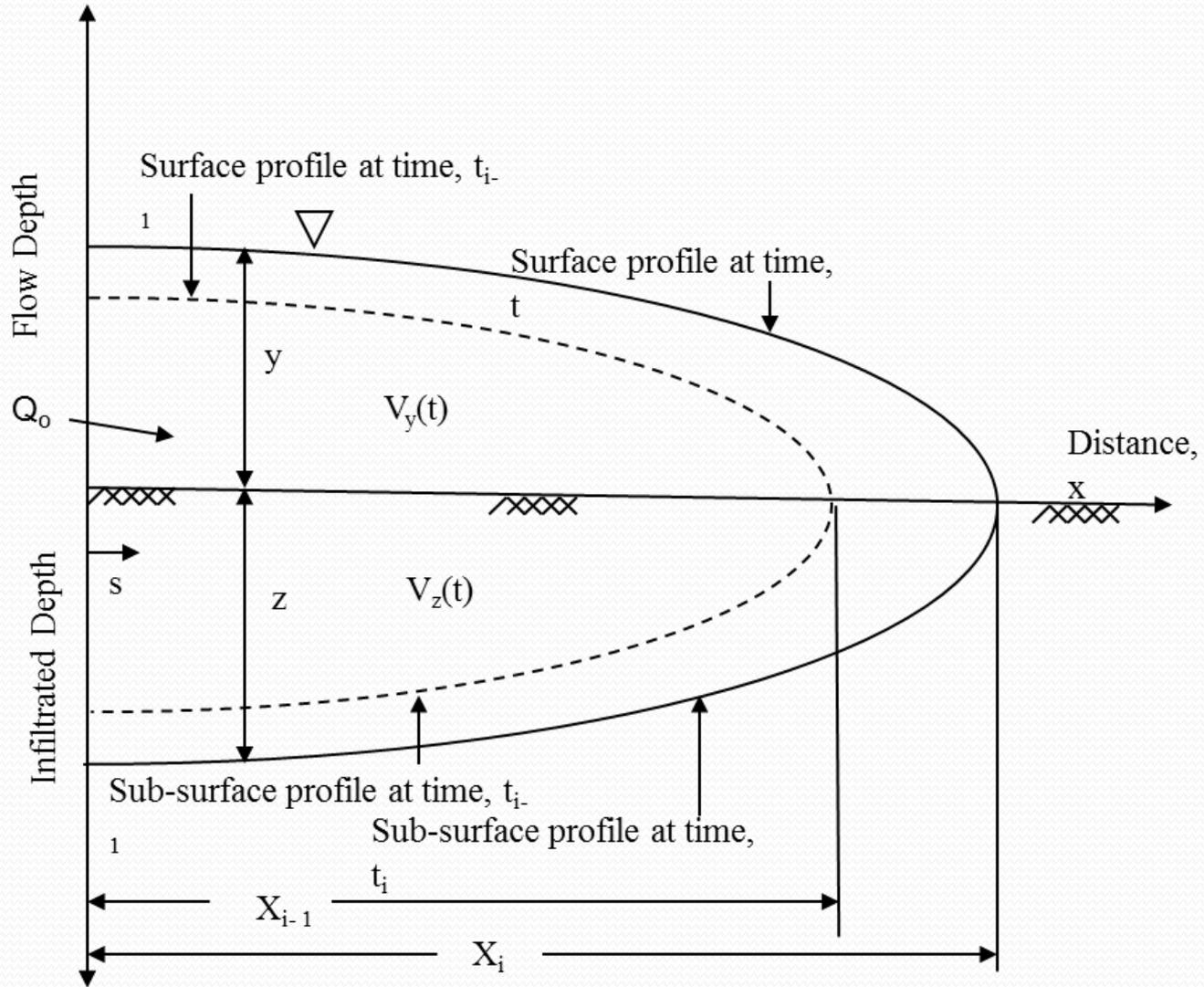
VARIABLES DE DECISIÓN DE RIEGO DE SUPERFICIE

- (3) Variables de gestión
- Estos incluyen la tasa de entrada, el tiempo de corte y la profundidad de riego requerida.
- La profundidad de riego requerida se puede determinar mediante la programación de riego.
- La tarea principal es regar el campo eligiendo una combinación adecuada de la velocidad de entrada y el tiempo de corte para obtener un mejor rendimiento de riego dentro de las limitaciones existentes.
- Entre todas las variables de riego, la velocidad de entrada y el tiempo de corte ofrecen la mayor flexibilidad para un tomador de decisiones.
- Esta flexibilidad en la velocidad de entrada y el tiempo de corte está relacionada con el sistema de entrega

Hidráulica de Riego Superficial

- Durante el riego de superficie, la hidráulica del flujo cambia con el tiempo y el espacio.
- Se desarrollan diferentes regímenes de flujo en diferentes tiempos y espacios. Sin embargo, el régimen de flujo dominante que prevalece durante la mayor parte del tiempo puede caracterizarse por un flujo de superficie libre inestable variado gradualmente.
- Un cambio típico en el perfil de la superficie del agua durante un pequeño intervalo de tiempo durante el avance del agua.
- El flujo es inestable, porque el caudal y la profundidad en cada punto aumentan con el tiempo debido a las características de ingesta dependientes del tiempo del suelo y no es uniforme, porque tanto el caudal como la profundidad disminuyen gradualmente en el campo.

Hidráulica de Riego Superficial



Surface and sub-surface profiles at a small time increment during irrigation.

Hidráulica de Riego Superficial (Contd.)

- El flujo de agua sobre la superficie del suelo durante el riego superficial puede caracterizarse por las ecuaciones de continuidad de St. Venant y las ecuaciones de momento:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} + I = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} = g(S_0 - S_f) + \frac{VI}{2A} \quad (4)$$

where Q = flow rate (L^3/T or L^2/T in border irrigation)

A = cross-sectional area of flow (L^2)

I = volume rate of infiltration per unit length of the channel or border (L/T),

V = average velocity in the flow cross-section (L/T)

g = gravitational acceleration (or ratio of weight to mass), (L/T^2),

Hidráulica de Riego Superficial(Contd.)

y = flow depth (L)

S_o = channel bottom slope

S_f = channel friction slope

x = distance in the direction of flow (L)

t = time (T)

$g\partial y / \partial x$ = unbalanced hydrostatic pressure force on the surface water,

S_o = component of the gravitational force in the direction of flow

S_f = slope of the energy grade line or hydraulic drag

$V\partial V / \partial x$ = local acceleration (a measure of unsteadiness),

$V\partial V / \partial x$ = convective acceleration (a measure of non-uniformity)

$(VI)/(2A)$ = net acceleration stemming from the removal of zero-velocity components of the surface stream at the bed by infiltration.

Hidráulica de Riego Superficial(Contd.)

- Las ecuaciones (3) y (4) se basan en los siguientes supuestos:
- El fluido es incompresible; es decir, la densidad del agua es constante
- El flujo es unidimensional.
- La presión es hidrostática.
- La curvatura aerodinámica es pequeña.
- La pendiente inferior del canal es pequeña.

Modelos Hidráulicos de Riego Superficial

Se han desarrollado varios modelos de riego de superficie basados en formas simplificadas de las ecuaciones de St. Venant como

Cero inercia

Onda cinemática

Cero inercia

Descuida los términos de inercia y aceleración en la ecuación (4):

$$\frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_f \quad (5)$$

Debido a que las velocidades de flujo durante la mayoría de los riegos superficiales son bajas y, por lo tanto, las aceleraciones son pequeñas y pueden descuidarse.

Los modelos de riego de superficie basados en las ecuaciones (3) y (5) se denominan modelos de inercia cero.

Se ha encontrado que los modelos de inercia cero producen resultados tan precisos como los modelos hidrodinámicos completos.

Modelos Hidráulicos de Riego Superficial (Contd.)

Onda cinemática

Se obtiene descuidando el término del gradiente de profundidad del agua en la ecuación (5) que reduce la ecuación de momento a:

$$S_0 = S_f \quad (6)$$

Esta simplificación es razonable si la pendiente del fondo es lo suficientemente empinada.

Las ecuaciones (3) y (6) constituyen la base de los modelos de onda cinemática.

La ecuación (6) puede expresarse como una relación entre la profundidad y la descarga, como la ecuación de Manning o Chezy.

Los modelos de onda cinemática tienen una aplicación limitada en condiciones de drenaje libre y en pendiente.

Las soluciones de ondas cinemáticas pueden no ser adecuadas para bordes con pendiente cero o pequeña o bordes bloqueados. Los

Modelos Hidráulicos de Riego Superficial

- The volume balance equation for any time (t) can be expressed as:

$$Q_0 t = V_y(t) + V_z(t) \quad t < T_a \quad (7)$$

where Q_0 = steady inflow rate (m^3/min)

t = time since the beginning of irrigation (min)

T_a = advance time (min)

V_y = volume of surface storage at time t (m^3)

V_z = volume of infiltrated water at time t (m^3).

Modelos de riego de balance de volumen

- The volume of surface storage at any time t over the advance distance can be determined by integrating the flow area as:

$$V_y(t) = \int_0^x A(s,t) ds = \bar{A} x = \sigma_y A_0 x \quad (8)$$

where A = cross-sectional area of flow;

\bar{A} = is the average flow cross-sectional area; σ_y is the surface shape factor (varying between 0.70 and 0.80, but often taken as 0.77)

s = variable of integration

A_0 = inlet area related to the normal depth corresponding to the inflow rate, roughness, field slope and hydraulic radius at the field inlet

- A_0 can be expressed as:
$$A_0 = \left(\frac{Q_0^2 n^2}{3600 \rho_1 S_0} \right)^{1/\rho_2} \quad (9)$$

Modelos de riego de balance de volumen (Contd.)

where Q_0 = inflow rate ($\text{m}^3/\text{min}/\text{unit width}$)

n = Manning's roughness coefficient

S_0 = field slope

ρ_1 and ρ_2 = the empirical shape factors

Si existe una condición de pendiente nivelada (p. Ej., Cuenca), se supone que la pendiente de fricción en la ecuación de Manning es igual a la profundidad del flujo de entrada (y_0) dividida por la distancia delantera de avance (x)

Entonces la ecuación (9) se convierte en: (10)

$$A_0 = y_0 = \left(\frac{Q_0^2 n^2 x}{3600} \right)^{0.24}$$

El área de superficie varía de A_0 en la entrada del campo a cero en la punta de avance

Modelos de riego de balance de volumen (Contd.)

- El enfoque de balance de volumen descuida la variación espacio-temporal de A y asume un área promedio constante.
- El volumen infiltrado sobre la distancia de avance en cualquier momento t se puede determinar de la siguiente manera:

- $$V_z(t) = \int_0^x Z(s,t) ds = \int_0^x Z(t-t_s) ds = \sigma_z Z_0 x \quad (11)$$

- donde Z = volumen infiltrado por unidad de área

- t - t_s = tiempo de oportunidad de admisión

- t_s = tiempo cuando el frente de agua alcanza la distancia, s

- Z₀ = volumen infiltrado por unidad de área en la entrada del campo

- σ_z = factor de forma debajo de la superficie (la relación del volumen infiltrado a lo largo de la distancia s al volumen infiltrado en la entrada del campo)

- Se supone que Z (s, t) no es una función de la profundidad de la superficie del agua, sino que depende del tiempo de oportunidad de admisión.

Modelos de riego de balance de volumen(Contd.)

- Sustituyendo el volumen de almacenamiento en superficie [ecuación (8)] y el volumen de infiltración [ecuación (11)] en la ecuación (7), se obtiene la ecuación de balance de volumen de Lewis-Milne (1938):

$$Q_0 t = \bar{A} x + \int_0^x Z(t-t_s) ds = \sigma_y A_0 x + \sigma_z Z_0 x \quad (12)$$

Modelo de balance de volumen de Power Advance

Las técnicas de solución utilizadas para resolver la ecuación (12) se pueden agrupar en cuatro categorías:

Enfoque numérico o recursivo

Enfoque de la función del núcleo

Transformación de Laplace

Enfoque de avance de potencia

El término integral en la ecuación (12) es una integral de distancia de una función dependiente del tiempo

Enfoque de avance de potencia

Asume la siguiente relación funcional entre la tasa de avance y el tiempo:(13)

$$X = p t_x^r$$

Modelo de balance de volumen de Power Advance (Contd.)

en el que X = distancia de avance para la cuenca, borde o surco (m),
 t_x = tiempo de avance a la distancia x desde el comienzo del riego
(min)

p y r = parámetros ajustados.

Usando el avance de potencia dado por la ecuación (13) junto con la ecuación de infiltración de Kostiakov modificada [ecuación (12)]:

$$Q_0 t_x = \sigma_y A_0 X + \sigma_z X k t_x^a + \sigma'_z f_c t_x X \quad (14)$$

en el que Q_0 = tasa de entrada (m^3 / min),

A_0 = área de flujo de sección transversal en la entrada (m^2)

X = distancia de avance (m)

t_x = tiempo de avance a distancia x desde el inicio del riego (min)

k y a = coeficientes de la ecuación de Kostiakov modificada

Modelo de balance de volumen de Power Advance(Contd.)

- fc = tasa de infiltración básica ($m^3 / m / min$)
- p y r = parámetros empíricos de la curva de avance
- σ_y = factor de almacenamiento en superficie

-

- σ'_z se puede definir como:
$$\sigma'_z = \frac{a + r(1-a) + 1}{(1+a)(1+r)}$$
 (15)

- $\sigma'_z = \frac{1}{1+r}$ (d)

- La ecuación (14) puede usarse para determinar los parámetros de infiltración de Kostiakov modificados utilizando la información de distancia y tiempo de avance en dos puntos a lo largo del campo o avanzar al final del campo conociendo los parámetros de infiltración

- Este método también se conoce como "método de dos puntos".

Evaluation of Infiltration Parameters

- The two points most often correspond to the half of the field length ($L/2$) and the field length (L).
- By substituting these pairs in equation (14) one can obtain two volume balance equations corresponding to a half field length and full field length:

$$Q_0 t_{L/2} = \sigma_y A_0 \frac{L}{2} + \sigma_z k t_{L/2}^a \frac{L}{2} + \sigma'_z \frac{f_0 t_{L/2} L}{2} \quad (17)$$

$$Q_0 t_L = \sigma_y A_0 L + \sigma_z k t_L^a L + \sigma'_z f_0 t_L L \quad (18)$$

- Multiplying equation (17) by $2/L$ throughout, one denotes :

$$V_{L/2} = \frac{2Q_0 t_{L/2}}{L} - \sigma_y A_0 - \sigma'_z f_0 t_{L/2} \quad (19)$$

Evaluation of Infiltration Parameters (Contd.)

- Equation (17) can be expressed as:

$$\sigma_Z k t_{L/2}^a = V_{L/2} \quad \text{or} \quad a \ln(t_{L/2}) + \ln \sigma_Z + \ln k = \ln(V_{L/2}) \quad (20)$$

- By dividing equation (18) by L throughout:

$$V_L = \frac{Q_0 t_L}{L} - \sigma_y A_0 - \sigma'_z f_0 t_L \quad (21)$$

- Thus, equation (18) can be expressed as:

$$\sigma_Z k t_L^a = V_L \quad \text{or} \quad a \ln(t_L) + \ln k + \ln \sigma_Z = \ln(V_L) \quad (22)$$

- From equations (20) and (22), constant “a” can be obtained as:

$$a = \frac{\ln(V_L / V_{L/2})}{\ln(t_L / t_{L/2})} \quad (23)$$

Evaluation of Infiltration Parameters (Contd.)

- k can be obtained as:

$$k = \frac{(1+a)(1+r)V_L}{[a+r(1-a)+1]t_L^a} \quad (24)$$

- The two-point method does not estimate the basic infiltration rate (f_c), which is generally determined using information on inflow and outflow as:

$$f_c = \frac{Q_0 - Q_r}{L} \quad (25)$$

where Q_0 and Q_r = inflow and runoff (outflow) rates, respectively
(m^3/min)

L = length of the field (m).

THANK YOU