

62.1.6  
C555 d  
1042  
C.1

DRENAJE DE TIERRAS IRRIGADAS

JERALD E. CHRISTIANSEN

PROFESOR DE INGENIERIA CIVIL Y DE RIEGO  
UTAH STATE UNIVERSITY, LOGAN, UTAH, EE. UU.

CIDIAT  
CENTRO INTERAMERICANO  
DE DESARROLLO INTEGRAL  
DE AGUAS Y TIERRAS

01042



## Definición de drenaje

Antes de entrar a la discusión de drenaje, conviene circunscribirnos a lo que se expresa con el término. Al igual que otras muchas palabras, drenaje tiene diversos significados y no quiere decir lo mismo para todas las personas. Como lo explicamos aquí, drenaje significa la remoción de exceso de agua de una zona irrigada; pero no sólo la remoción del exceso del agua superficial, sino también, y es lo más importante, la remoción del exceso de agua de la zona radical y de la que se encuentra debajo de la misma en los campos de cultivo.

El drenaje es practicado tanto en zonas húmedas como en zonas irrigadas. En zonas húmedas, donde la salinidad es raramente problema, lo esencial del drenaje es mantener una zona de aereación sobre la capa freática, de manera que una máxima producción puede ser obtenida por medio de los cultivos. La mayoría de las plantas agrícolas no prosperan, y muchas de ellas morirían, si la zona radical permanece saturada por un largo período de tiempo.

En las áreas irrigadas, donde debemos considerar el problema de la salinidad, es también necesario mantener una zona radical aereada, pero probablemente sea de mayor importancia mantener la zona radical razonablemente libre de sales solubles.

A pesar de que el término drenaje, tal como se define aquí, incluye el desague natural, que ocurre en muchas zonas irrigadas, o en algunas partes de estas zonas, lo usaremos aquí para significar: el desague que es obtenido por esfuerzo humano. El término desague artificial, será por lo tanto muy raramente usado. Asimismo, el término drenaje se empleará en general para significar drenaje del subsuelo o remoción de aguas subte -

rráneas; y el término drenaje superficial, será empleado para significar la remoción del exceso de aguas superficiales.

### Principios del drenaje

Luthin, en la monografía sobre "Drenaje de Tierras Agrícolas" dice que la práctica del drenaje es tan vieja como el arte de la agricultura. Es bien conocido que los romanos reconocieron la importancia del drenaje y que ellos la practicaron. Si los pueblos del Gran Valle de Mesopotamia, reconocieron o no la importancia del drenaje, en relación a sus prácticas de irrigación, que se remonta a más de 5000 años, o si no alcanzaron éxitos en el drenaje, a consecuencia de las numerosas dificultades envueltas, puede ser un punto a discutir; pero hay un hecho cierto que permanece incontrovertible y es que el fértil valle se transforma en tierra inapropiada para cultivo a consecuencia de la acumulación de sales del suelo. Este es un buen ejemplo de lo que significa la acumulación de altos niveles de sal a pesar del uso del agua de calidad razonablemente buena. En vez de resolver el problema, con su adecuado drenaje, simplemente aprendieron a vivir con la sal y adoptaron prácticas culturales, que le permitieron cultivar las tierras con granos como la cebada y el trigo. No hace falta decir que, bajo estas prácticas culturales, el rendimiento era muy bajo, para nuestros niveles.

El desarrollo teórico de la ciencia del drenaje, se considera que empezó con los trabajos de Henry Darcy, en Francia, hace más de 100 años. En la medida que es conocido, él fué el primer hombre en desarrollar la teoría del flujo del agua a través de los suelos, y la ecuación básica que se usa hoy en día, para describir el flujo de las aguas a través de los suelos, es conocida como la Ley de Darcy.

Los métodos de drenaje usados en la antigüedad, mejoraron muy poco hasta el desarrollo de la técnica del tubo de barro u tilizado por primera vez en el fondo de Sir James Graham, en Inglaterra, en el año 1810.

El término, principios de drenaje, puede ser definido a la ligera, como la comprensión de las necesidades de drenaje y de las leyes que gobiernan el flujo de las aguas a través de los suelos, y de las distintas clases de canales y conductos usados para la remoción de las aguas de los suelos.

En nuestra moderna agricultura, la práctica de la irrigación ha avanzado mucho más que la del drenaje. En muchos de los primeros proyectos de irrigación en los EE.UU., la necesidad de drenar las tierras, o no fué reconocida, o no se entendió completamente, hasta que grandes áreas se convirtieron en terrenos perdidos y salinos, pero en tal época, a los dueños les era imposible enfrentar los gastos necesarios para encarar la rehabilitación y muchas de esas áreas fueron abandonadas.

La práctica común hoy, en los EE.UU., es considerar la necesidad del drenaje, al propio tiempo que se planifica el proyecto de irrigación, proveyendo la red de drenaje junto con el sistema de irrigación. Las demás facilidades de drenaje pueden ser proveídas tan rápidamente como las necesidades surjan. Sin embargo, todavía hay muchos agricultores, especialmente en aquellas áreas donde las aguas para la irrigación son de excelente calidad y los problemas de salinidad son poco aparentes, que aún no están convencidos de las ventajas del drenaje; y en vez de drenar, escojer prácticas de aprovechamiento de las tierras húmedas. En mi propio estado de Utah, grandes áreas de tierras húmedas están siendo usadas solamente como pastizales, cuando con adecuado drenaje, las mismas pudieran producir cosechas más valiosas.

## Métodos de drenaje

Hay muchos métodos de drenaje y ninguno que pueda considerarse el mejor, para todas y cada una de las circunstancias posibles de encontrar en la práctica.

Cabe agrupar en dos diferentes tipos:

1. La remoción del exceso de agua subterránea por bombeo desde pozos y descarga dentro de los canales de irrigación o en las zanjas de evacuación;
2. La remoción de los excesos de agua por recolección de las mismas en drenes abiertos o cerrados, y descargas subsecuentes de los excesos dentro de corrientes naturales por gravedad o por bombeo.

Frecuentemente en discusiones sobre drenaje, el tema bombeo se descarta o sólo se trata muy brevemente. Sin embargo, en muchas partes del mundo, grandes áreas están completamente libres de altos niveles y por consiguiente muy bien drenadas, como resultado del bombeo de agua subterránea con propósitos de drenaje o más frecuentemente para abastecimiento de aguas de irrigación. En muchas de estas áreas, la palabra drenaje no se menciona y ni siquiera se considera, sencillamente porque no hay problema de drenaje.

Los sistemas de drenaje por gravedad, consisten generalmente en una salida principal y en una red de drenes, largos y profundos, generalmente suplementados por sistemas de drenaje de las propiedades individuales; que usualmente consisten en tuberías que descargan dentro de drenes abiertos más profundos. En muchas de las áreas irrigadas de los EE.UU., se necesitan sistemas completos de drenaje de este tipo para toda o casi to

das las áreas irrigadas; pero en muchas otras áreas, donde el drenaje natural en las tierras más altas es suficiente, los sistemas de drenaje sólo son utilizados en las tierras más bajas, donde se desarrolla un alto nivel freático. En algunos lugares es suficiente una red de grandes drenes abiertos espaciados a intervalos de 800 a 1600 metros y no se necesitan tuberías de drenaje en las propiedades.

Los sistemas de drenaje por gravedad funcionan esencialmente como instrumentos de evacuación, que remueven constantemente la parte superior del depósito de las aguas subterráneas, manteniendo el nivel freático lo suficientemente bajo para asegurar la aereación de la zona radical. Estos sistemas tienden por consiguiente, a remover la alta concentración salina de las aguas subterráneas, las cuales en algunas de estas áreas, aún a mayores profundidades, pueden ser de mucha mejor calidad y adecuadas para la irrigación.

En muchos valles aluviales de gran magnitud, los ríos siguen entre "bordos" que han sido construidos por la naturaleza con el pasar de los siglos, a través de continuos desbordamientos y de procesos de sedimentación. El nivel de las tierras a lo largo de las márgenes de los ríos, puede ser varios metros más alto, que a una distancia de varios kilómetros de las mismas. Los suelos cerca del río son generalmente de textura gruesa, franco-arenosos y franco-limoso y los de las depresiones, a alguna distancia del río de texturas arcilloso con baja permeabilidad. Cerca de las márgenes de los ríos, los suelos presentan un cierto grado de drenaje natural, pero un poco más lejos se requiere la construcción de sistemas de drenaje.

En estas tierras bajas, situadas a cierta distancia de los ríos es donde el drenaje es generalmente un problema difícil

de resolver. Los drenes por gravedad frecuentemente deben ser extendidos largas distancias para devolver las aguas al río. Algunas veces estas distancias pueden acortarse considerablemente, por bombeo de las aguas al nivel del río. Estas estaciones de bombeo resultan en ocasiones esenciales a los efectos de obtener algún beneficio del drenaje, durante los períodos de avenidas; y es en esos períodos húmedos de crecidas de los ríos, en los que más frecuentemente se necesita el drenaje. El gran Valle de la Mesopotamia, en Iraq, y el Valle de Sacramento en California, son ejemplos típicos de los valles aluviales de los descritos anteriormente.

#### Movimiento del agua subterránea y permeabilidad del suelo

Los depósitos subterráneos de agua son similares en algunos aspectos a los grandes depósitos superficiales o lagos, difieren sin embargo, en otros aspectos importantes. La superficie del depósito subterráneo es el nivel freático, excepto en condiciones donde existe una capa aperchada, en cuyo caso hay más de una superficie. El nivel del agua subterránea no es plana como lo es la superficie de un lago. En tal caso, sigue una paralela aproximada a la superficie del suelo, y ésto depende grandemente de la formación geológica del suelo. En capas aluviales profundas de material grueso de alta permeabilidad, puede aproximarse a un nivel plano, pero en perfiles de suelo bien desarrollados más antiguos se encuentran frecuentemente un estrato de relativa baja permeabilidad, cerca de la superficie del suelo, y la capa freática se encuentra frecuentemente encima de este estrato. La configuración de la superficie de la capa freática, se asemeja más a la configuración de la superficie que a un nivel plano.

Excepto, en el caso poco frecuente de que la superficie

freática es un plano a nivel, el agua en el depósito de agua superficial está en constante movimiento, tratando siempre de aplanar su superficie en busca de la forma de nivel plano. Bajo condiciones normales los depósitos de agua superficial tienen escapes y ganancias de aguas o sean entradas y salidas. Las ganancias o entradas de agua, se producen por medio de corrientes o flujos sub-superficiales procedentes de montañas cercanas, por filtraciones procedentes de los ríos y corrientes tributarias y por contribuciones directas del propio suelo, cuando las lluvias penetran más allá de la zona radical. En las áreas irrigadas, las contribuciones adicionales proceden del exceso de agua aplicada a los campos, y de las pérdidas por filtraciones en los canales y acequias; estas contribuciones tienden a producir levantamientos del nivel freático en relación al plano a nivel, en los lugares por donde estas filtraciones llegan al mismo. Mapas detallados del agua superficial, con la red de elevación de la superficie freática marcados con curvas de nivel, muestran generalmente estas elevaciones.

Los depósitos de agua superficial también tienen pérdidas ó salidas naturales; antes de someterse al riego ó bombeado el depósito subterráneo, éste está en un estado de equilibrio con el clima. Las aguas o corrientes sub-superficiales, se escapan a valles más bajos. Frecuentemente en las partes más bajas del valle las aguas escurren de nuevo a los canales naturales y esos escurrimientos son conocidos como flujos o corrientes efluentes. Una gran parte de la pérdida total de agua del depósito natural de agua superficial se produce frecuentemente por evaporación y transpiración del área natural húmeda, donde las raíces de la vegetación están en contacto con el nivel freático o sobre éste. El bombeo de agua del depósito subsuperficial hace bajar el nivel freático natural y reduce los desperdicios naturales. Si se bombea una cantidad mayor de a-

agua que lo que entra a través de los medios naturales y la que provee el riego, el nivel de la capa freática continuará bajando. La única agua nueva que se puede obtener, bombeándola por medio de pozos, es aquella que previamente se había perdido a través de los escurrimientos naturales, más que la que corresponde a la adicional contribución de riego. Este hecho, es frecuentemente ignorado y los depósitos subsuperficiales son generalmente deprimidos por el bombeo.

El movimiento de aguas subterráneas, obedece a varias leyes fundamentales, que han sido reconocidas tan sólo hace poco más de un siglo. Como dijimos anteriormente, al francés Henry Darcy se le acredita el descubrimiento del principio que lleva su nombre, que es: la velocidad del flujo o corriente a través de un medio poroso, es proporcional al gradiente hidráulico. Matemáticamente se expresa de la manera más simple:

$$V = K i \quad . . . . \quad (1)$$

Donde:

V es la velocidad macroscópica

K es un factor de proporcionalidad

i es el gradiente hidráulico, o la pérdida de carga por unidad de distancia en dirección de la corriente.

K en esta ecuación es generalmente llamada el factor o coeficiente de permeabilidad de Darcy, pero es más propio llamarlo conductividad hidráulica. Este coeficiente es realmente una función de ambos, las propiedades del fluido y las del medio poroso; e incluye el factor de aceleración de la gravedad, g. Este factor generalmente se ignora y no toma en cuenta al tratar con aguas <sup>subterránea</sup> superficiales, por razón de que la temperatura del agua <sup>subterránea</sup> superficial, y por ende su viscosidad, no varía

grandemente en una localidad dada. La otra propiedad principal del fluido, agua en este caso, es la densidad, y ésta es casi constante en el agua. Para un medio poroso dado que corresponde a un suelo específico, consideramos constante las propiedades que entran en el valor de K constante, en relación al factor tiempo. Y al expresar nuevamente la relación matemática, tenemos:

$$K = f (D^2 g \rho / \mu) \quad . . . . . (2)$$

Donde:

- f representa un factor de proporcionalidad e indica una función.
- D es el promedio de tamaño del gránulo o dimensión de los poros.
- g es la aceleración de la gravedad.
- $\rho$  es la densidad del fluido
- $\mu$  es la viscosidad del fluido.

Generalmente, sin embargo, K es considerada una constante que representa las propiedades del medio poroso. Para estudios de permeabilidad en el laboratorio, donde la temperatura del agua puede variar apreciablemente, es costumbre rectificar los valores de K obtenidos por medición directa, multiplicándolos por la relación de viscosidad, para rectificarlo a una temperatura, tal como 20°C. En esta relación:

- $\mu_s$  es la viscosidad a la temperatura standard.
- $\mu$  es la viscosidad a la temperatura real dada.

El volumen total de agua que pasa a través de una sección dada, en una determinada unidad de tiempo se expresa por la relación:

$$Q = A V \quad . . . . . (3)$$

$$= A K i \quad . . . . . (4)$$

$$= A K dh/dL \quad . . . . . (5)$$

Donde:

Q es el caudal

A es el área de las secciones transversales

dh/dL es el gradiente de la pérdida de carga, o gradiente hidráulico.

Otro término frecuente y conveniente empleado en el campo del trabajo del agua subterránea, es la transmisibilidad,  $T_m$ . Las letras  $T_m$  se usarán para indicar transmisibilidad y t será empleada para expresar tiempo. Transmisibilidad  $T_m$ , es entonces:

$$T_m = K m$$

Donde:

m es la profundidad total del perfil del suelo, a través del cual se produce el flujo horizontal.

Esto es usualmente tomado como la distancia desde el nivel freático hasta el tope del primer estrato impermeable. El término "impermeable", se usa aquí, como en las más de las veces, para expresar una muy baja permeabilidad, o baja conductividad hidráulica, en relación a aquella del estrato superior, o inferior al manto acuífero; o cualquier otro estrato de muy alta permeabilidad. Cuando se usa con referencia al flujo o corriente artesiana a través de un acuífero, la profundidad del acuífero, se considera el valor de m.

Por consiguiente puede observarse que:

V y K	tienen dimensiones de velocidad, L/T
i	es adimensional
dh y dL	tienen dimensión de longitud, L
Q	tiene dimensión de caudal, L <sup>3</sup> /T
dh/dL	es dimensional
T <sub>m</sub>	tiene dimensión de caudal, por unidad de espesor, L <sup>3</sup> /TL = L <sup>2</sup> /T.

Las aplicaciones de la ley de Darcy al campo específico de los problemas al agua, será discutido en próximas conferencias.

#### Definición de algunos términos técnicos relativos al sub-suelo

Unos cuantos términos que se usan con referencia a las condiciones del sub-suelo, requieren ser definidos a continuación:

##### Sub-suelo homogéneo:

Un suelo que es relativamente uniforme en cuanto a textura y otras características en una considerable profundidad, con relación al espaciamiento de los drenes. Los sub-suelos pueden considerarse en esta categoría si son razonablemente uniformes en una profundidad de 10 m. o más.

##### Sub-suelo estratificado:

Un suelo que varía en su textura o en su estructura dentro de una profundidad de 10 m. o menos. La mayoría de los suelos caen dentro de esta categoría.

Isotrópicos: Un suelo que tiene aproximadamente la misma conductividad hidráulica en ambas direcciones: vertical y horizontal. La conductividad hidráulica en la mayoría de los suelos, es mayor en dirección horizontal que en dirección vertical, aún cuando parecen ser homogéneos, por razón de micro-es-

tratificación. Para los propósitos de este análisis, los suelos considerados homogéneos, pueden también considerarse isotrópicos.

Permeables: Un suelo es considerado permeable si su conductividad hidráulica es tal que el agua se mueve a su través con el gradiente hidráulico que existe naturalmente o que puede ser creado por medio de trabajos de drenaje, a una velocidad suficiente para permitir un drenaje económico. Desde el punto de vista práctico, todos los materiales o elementos del subsuelo son permeables hasta cierta extensión; pero donde la velocidad de movimiento del agua es tal, que pudiera no tener efectos apreciables en el drenaje del sub-suelo, el suelo será considerado impermeable.

Impermeable: Un suelo, o estrato del suelo, a través del cual el agua se mueve tan lentamente bajo el gradiente hidráulico, que existe o puede ser creado, que la velocidad pueda ser despreciada a todos los efectos prácticos, será considerado impermeable. De esta manera, el término es por consiguiente un término relativo que se relaciona con el método a usar para el drenaje. Por ejemplo, si un suelo es razonablemente permeable, desde la superficie hasta una profundidad de pocos metros, debajo del cual hay estratos de arcilla o de otro material cualquiera pero de tan baja permeabilidad que prácticamente todas las corrientes horizontales hacia el dren fluirán por encima de ese estrato, este suelo se considera impermeable. En cambio si el método de drenaje será por bombeo, desde acuíferos altamente permeables, por debajo del cual se encuentran estratos de baja permeabilidad, entonces no lo podemos considerar impermeable, si la conductividad es suficiente para permitir el paso del agua hacia abajo, a través del mencionado estrato, bajo el relativamente alto gradiente hidráulico verti-

cal que pueda ser creado por este método de drenaje. En este caso, una conductividad hidráulica del suelo a 0.01 cm. por día, podrá ser suficiente para hacer muy factible un drenaje por pozos.

### Conductividad hidráulica en direcciones vertical y horizontal

A causa de que muchos suelos están estratificados hasta cierto punto, el promedio de conductividad hidráulica para un espesor vertical dado,  $Z$ , puede ser muy diferente en cualquiera de las dos direcciones, vertical y horizontal.

Asumiendo que la profundidad total  $Z$  está integrada por número de estrato de espesor variado,  $z_1, z_2 \dots z_n$ , etc. entonces tenemos:

$$Z = z_1 + z_2 + z_3 + \dots + z_n \quad (7)$$

El promedio de conductividad hidráulica para el estrato  $z_1$  es  $k_1$  y para el estrato  $z_2$  es  $k_2$ , etc.

El caudal o flujo correspondiente, a través de cada estrato, será  $q_1, q_2$ , etc.

El caudal o flujo horizontal a través del espesor total sería:

$$Q_h = q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n \quad (8)$$

y

$$q_1 = k_1 z_1 i, \text{ etc.} \quad (9)$$

y

$$Q_h = K_h Z i \quad (10)$$

Entonces,

$$K_h Z i = i (k_1 z_1 + k_2 z_2 + k_3 z_3 + \dots + k_n z_n)$$

y

$$K_h = \frac{k_1 z_1 + k_2 z_2 + k_3 z_3 + \dots + k_n z_n}{Z} \quad (11)$$

Consideremos el caudal a través de una sección vertical:

$$Q_v = K_v i = K_v H/Z \quad (12)$$

Donde H es la pérdida de carga total, de donde:

$$H = h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_n \quad (13)$$

El caudal a través de cada estrato será el mismo, por lo tanto:

$$Q = q_1 = q_2 = q_n, \text{ etc.} \quad (14)$$

De donde:

$$h_1 = \frac{Q z_1}{k_1} = \frac{K_v H z_1}{Z k_1}$$

y,

$$h_2 = \frac{K_v H z_2}{Z k_2}, \text{ etc.}$$

Por consiguiente,

$$H = \frac{K_v H}{Z} (z_1/k_1 + z_2/k_2 + z_3/k_3 + \dots + z_n/k_n) \quad (15)$$

y

$$K_v = Z / (z_1/k_1 + z_2/k_2 + z_3/k_3 + \dots + z_n/k_n) \quad (16)$$

Las ecuaciones (11) y (16) muestran que, si el espesor de cada estrato es el mismo, el valor promedio de la conductividad hidráulica horizontal,  $K_h$ , podrá ser el promedio numérico de los valores  $k_1, k_2$ , etc., pero que el valor promedio de la conductividad hidráulica vertical resultaría un poco menor.

#### Condiciones típicas del sub-suelo y de las aguas subterráneas

Hay un número infinito de situaciones del sub-suelo y de aguas subterráneas, con muy pocas condiciones idénticas en diferentes áreas. Estas difieren no sólo en la estratificación del subsuelo y su textura, sino también difieren con respecto a la topografía de la superficie. Y aquí vemos una relación entre la condición del agua subterránea y la topografía de la superficie.

Para el propósito de analizar los patrones de corrientes o flujos de las aguas subterráneas, con respecto a su remoción por medio de algún tipo de instalación de drenaje, puede describirse seis situaciones típicas del subsuelo y de las aguas subterráneas, a saber:

- Caso 1: Suelo homogéneo en profundidad con nivel freático cercano a la superficie. Ambas, superficie y capa freática casi a nivel. No hay cercano a la superficie del suelo, estratos impermeables o altamente permeables (no menos de 20 m.)
- Caso 2: Similar al caso 1, pero con un estrato relativamente impermeable cerca de la superficie. (Dentro de los 5 m.).
- Caso 3: Similar al caso 1, pero con un acuífero altamente permeable. (Dentro de los 100 m, a partir de la superficie).
- Caso 4: Subsuelo estratificado, pero permeable con estrato altamente permeable dentro de los 5 m. de la superficie. Ambas superficies del terreno y nivel freático, con ligera pendiente.
- Caso 5: Subsuelo homogéneo cercano a la superficie. (Dentro de los 10 m.). Similar al caso 3 pero con un estrato altamente permeable mucho más cerca de la superficie.
- Caso 6: Un subsuelo medianamente impermeable cerca de la superficie. Superficie del terreno y nivel freático, en pendiente.

Pueden ser descritos un número elevado de casos intermedios, variando algo las diferentes condiciones, pero para propósitos del análisis de considerarán los seis casos anteriormente enunciados. Los mismos servirán para ilustrar el flujo de agua con relación a los diferentes, pero posibles, métodos de drenaje.