

COMISION NACIONAL DE RIEGO

**CONCEPTOS GENERALES SOBRE
DISEÑO DE SISTEMAS DE
DRENAJE SUBSUPERFICIAL**

Dr. Luis G. Salgado Seguel
Ingeniero Agronomo Ph.D

CENTRO DE DOCUMENTACION
COMISION NACIONAL DE RIEGO

CHILLAN
AGOSTO - 1994

CONTENIDO

<u>CAPITULO</u>		<u>PAGINA</u>
I	INTRODUCCION.....	01
II	PARAMETROS DE DISEÑO.....	03
	2.1. Perfil del suelo.....	03
	2.2. Conductividad hidráulica.....	05
	2.3. Espacio poroso drenable.....	12
III	CRITERIOS DE DISEÑO.....	17
	3.1. Recarga.....	24
	3.1.1. Criterios para la estación de riego.....	24
	3.1.2. Criterios para la estación de lluvias.....	27
	3.1.3. Criterios para filtraciones laterales.....	28
	3.2. Profundidad de la napa.....	33
	3.3. Carga hidráulica.....	41
	3.4. Profundidad de los drenes.....	43
IV	ESTUDIO DE NIVELES FREATICOS.....	45
	4.1. Recolección de datos.....	46
	4.2. Procesamiento de datos.....	47
	4.3. Evaluación de datos.....	48

<u>CAPITULO</u>		<u>PAGINA</u>
V	CALCULO DEL ESPACIAMIENTO.....	49
VI	ASPECTOS CONSTRUCTIVOS.....	52
	6.1. Disposición de la red de drenaje.....	52
	6.2. Caudales de descarga.....	53
	6.3. Diámetros y pendientes.....	55
	6.4. Envolventes.....	56
	6.5. Instalación de drenes.....	58
VII	RECOMENDACIONES.....	59
VIII	REFERENCIAS BIBLIGRAFICAS.....	65

CONCEPTOS GENERALES SOBRE DISEÑO DE SISTEMAS DE DRENAJE SUBSUPERFICIALES (1)

Autor : Dr. Luis G. Salgado (2)

I. INTRODUCCION

La construcción de un sistema de drenes subsuperficiales con fines agrícolas, requiere la definición de parámetros y criterios de drenaje. Entenderemos por parámetros de drenaje aquellos que son propiamente del suelo y que están determinados por las características físicas del mismo, tales como: la conductividad hidráulica, la porosidad drenable, la profundidad de cada estrato y la profundidad al estrato impermeable.

En cuanto a los criterios de drenaje, como su nombre lo indica se refiere a los "criterios o decisiones" que el profesional debe tomar para satisfacer los requerimientos que el sistema exige. Entre éstos debemos considerar la recarga,

(1) Trabajo preparado por encargo de la Comisión Nacional de Riego.

(2) Ingeniero Agrónomo, Ph.D., Departamento de Riego y Drenaje, Universidad de Concepción.

la profundidad del nivel freático al punto medio entre los drenes, la carga hidráulica y la profundidad de los drenes.

Además de lo anterior, es necesario señalar que el profesional debe considerar otros aspectos que son también fundamentales en el diseño de drenes subsuperficiales y que podríamos denominar como factores constructivos. Entre dichos factores destacan el tipo de tuberías a emplear, el diámetro, la pendiente, el material envolvente, la disposición de los drenes en el terreno, etc.

En las páginas siguientes se hace una breve discusión sobre cada una de estas variables y se entregan algunas recomendaciones sobre los procedimientos a emplear para su determinación o selección, según corresponda.

II. PARAMETROS DE DISEÑO

Como ya se señaló, éstos dicen relación con las características físicas e hidrodinámicas del suelo donde se desea instalar un sistema de drenaje. A continuación se analizan separadamente algunos de estos parámetros.

2.1. Perfil del suelo

La mayoría de los estudios convencionales de suelos tienen serias deficiencias en cuanto a la información que se requiere con fines de drenaje. Por esta razón es altamente justificable que las bases técnicas de los concursos de la Ley 18.450 exijan un estudio agrológico detallado y específico de los suelos que se intenta drenar.

Sin embargo, a juicio del autor, lo indicado en el artículo 5º, letra e, del reglamento de la citada Ley, no contempla algunos aspectos fundamentales para el diseño de drenes subsuperficiales.

Estos son:

- a) Desde un punto de vista agrológico, es plenamente justificable la descripción del perfil del suelo separando

horizontes. Sin embargo, desde un punto de vista hidrodinámico es mucho más interesante que la separación se haga en base a "estratas" (agrupaciones de horizontes) los cuales sean efectiva y claramente diferentes, hidrodinámicamente hablando. Esto está íntimamente relacionado con la determinación de la conductividad hidráulica y del espacio poroso drenable, aspectos que se analizan más adelante.

- b) No se indica que dichos estudios debieran incluir específicamente la profundidad a la que se encuentra el estrato impermeable, parámetro fundamental en la definición de la región de flujo y consecuentemente en el cálculo del espaciamiento entre drenes.

Desde el punto de vista del drenaje, un estrato se considera impermeable cuando su conductividad hidráulica es $1/10$ (10 veces inferior) a la conductividad hidráulica del horizonte inmediatamente superior. En consecuencia, lo que aquí se sugiere es que las observaciones que se hagan en terreno deben ser lo suficientemente profundas para poder identificar la presencia de "panes" que, por su naturaleza física, son impermeables al paso del agua.

Una vez hecha esta identificación se debiera exigir que, junto al estudio agrológico, se incluya un perfil

longitudinal y uno transversal indicando la profundidad de dicho estrato impermeable.

Con el ánimo de reforzar la importancia de los aspectos indicados en los puntos a y b, se adjunta una copia de una "Guía descriptiva de suelos para drenaje" (Anexo 1) preparada en 1984 por el Ing. Agrónomo señor Alberto Kühne, como aporte al Grupo de Especialistas en Drenaje que en aquella época se intentó crear.

2.2. Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica saturada del suelo es, sin lugar a dudas, uno de los parámetros más determinantes en el cálculo del espaciamiento entre drenes. Un error del orden del 50% en su estimación implica variaciones de $\pm$ el 20% en el espaciamiento. Lo anterior demuestra claramente la importancia de este parámetro y justifica plenamente cualquier esfuerzo económico y de tiempo que sea necesario realizar.

No obstante existir una serie de métodos para determinarla o estimarla, éste sigue siendo uno de los parámetros más difíciles de obtener debido a las variaciones que presenta tanto espacial como temporalmente. Varía espacialmente acorde

a las variaciones que tiene el suelo en cuanto a sus características físicas, químicas y biológicas y varía temporalmente como producto de las transformaciones internas que se producen en el suelo al estar en condiciones saturadas, como asimismo debido a las actividades que realiza el hombre.

Consecuentemente, el asunto no consiste tanto en la precisión con que se haga una determinación puntual, sino en lograr que los valores obtenidos sean representativos de las condiciones reales del suelo. Por lo tanto, será conveniente tener en consideración lo siguiente :

a) La determinación de la conductividad hidráulica debe estar íntimamente relacionada con el estudio de suelos realizado, con el propósito de :

- * Seleccionar adecuadamente el método a utilizar

- * Definir la profundidad hasta la cual deben realizarse las determinaciones

b) Puesto que con fines de drenaje no tiene sentido conocer la conductividad hidráulica de una fase, de una unidad de manejo ni mucho menos de una serie de suelos, es indispensable realizar un gran número de determinaciones y con estos desarrollar un plano de "rangos" de conductividad (Figura 1) para finalmente elegir un valor

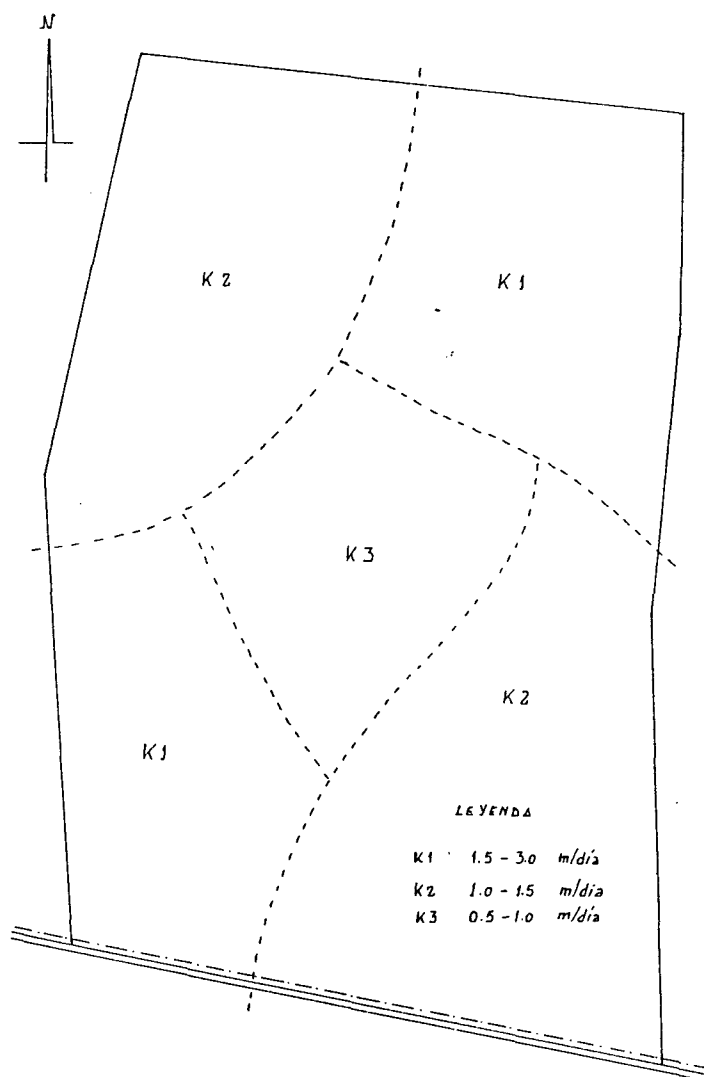


Figura 1. Plano de conductividad hidráulica de un suelo.

representativo dentro de dicho rango y proceder al calculo del espaciamiento, el cual es válido sólo dentro del área que ese rango indica.

La literatura entrega diversos criterios acerca del número de determinaciones que debieran realizarse por unidad de superficie, según la escala de trabajo. Considerando que los proyectos que se presentan a la Ley 18.450 no abarcan grandes extensiones y basado en mi propia experiencia profesional, recomendaría :

Superficie (ha)	°N determinaciones/ha
≤ 20	1
21 - 50	0.5
51 - 100	0.2
> 100	0.1

- c) En cuanto a la profundidad a la cual deben hacerse las mediciones, éstas están determinadas por el tipo de suelo existente. Se acepta generalmente que si el suelo es homogéneo, las determinaciones debieran hacerse hasta una profundidad equivalente a 1/8 del espaciamiento previsto; si el suelo es heterogéneo las determinaciones debieran hacerse hasta una profundidad equivalente a 1/20 del

espaciamiento previsto. En ambos casos, obviamente, el límite inferior es el estado impermeable.

- d) Con fines de diseño los únicos métodos recomendables a utilizar en la determinación de la conductividad hidráulica serán los de terreno y bajo una condición de nivel freático presente (pozo, piezómetro u otros, según corresponda).

Si las determinaciones se realizarán en una época en que no hay napa presente, se recomienda recurrir al método del pozo invertido, debido a la simplicidad de su procedimiento y a que el método permite determinar la conductividad hidráulica a cualquier profundidad deseada.

Sólo bajo circunstancias muy especiales debieran aceptarse determinaciones de laboratorio. En tal caso deben procesarse muestras no disturbadas, horizontales y verticales, para trabajar finalmente con un promedio de ambas.

En ningún caso debiera aceptarse valores de conductividad derivados a partir de curvas de retención de humedad o distribución del tamaño de partículas. Estos datos tienen solo un valor referencial.

Tampoco es recomendable el uso de tablas para relacionar la textura del suelo con la conductividad. Las variaciones del suelo son muy grandes entre un punto y otro como para aceptar que la textura que define la fase o la serie sea válida para toda el área que representa. Por otra parte, como se indica en las tablas siguientes, los rangos de variación de la conductividad para una misma textura pueden ser del orden de magnitud de 5 a 10 veces.

Tabla 1. Valores de conductividad hidráulica según textura

Textura	K m/día
Arena gruesa con grava	10-50
Franco arenosa fina; arena fina	1-5
Franco; franco arcilloso bien estructurado	1-3
Franco arenoso muy fino	0.5-2
Arcilla con grietas	0.5-2
Arena muy fina	0.2-0.5
Franco arcilloso, arcilloso mal estructurado	0.002-0.2
Arcilla compactada	< 0.002

Fuente : Grassi, J.C., 1981.

Tabla 2. Valores de conductividad hidráulica según textura

Textura	K m/día
Arcillas	0.01-0.2
Suelos francos	0.1-1
Arena fina	1-5
Arenas medias	5-20
Arenas gruesas	20-100
Gravas	100-1000
Arena y grava mezcladas	5-100
Arcillas, arena y gravas mezcladas	0.001-0.1

Fuente : Bouwer, H., 1971.

Dado el origen aluvial de la mayoría de los suelos del Valle Central de Chile, no es inusual que se necesite conocer la conductividad hidráulica de una estrata constituida por una gran cantidad de piedras y gravas con una matriz arenosa o arcillosa. Bajo tales condiciones, normalmente no es posible utilizar un barreno para proceder según la teoría del pozo. En tales circunstancias se sugiere utilizar una "prueba de bombeo" que consiste en:

- * Confeccionar un pozo de diámetro conocido
- * Bobear agua a caudal constante hasta alcanzar condición de equilibrio
- * Calcular la conductividad hidráulica según una expresión como la siguiente :

$$K = \frac{Q}{C_r \Delta H}$$

donde :

K = conductividad hidráulica (m/día)

Q = caudal de bombeo (m³/día)

C=f (H/S) = factor geométrico (adimensional)
 $\frac{H^2 - h^2}{H}$

$\Delta H = \frac{H^2 - h^2}{H}$ (m)

H = distancia desde el fondo del pozo al nivel freático en su condición inicial (m)

h = distancia del fondo del pozo al nivel de agua dentro del mismo luego de alcanzada una condición de equilibrio a caudal constante (m)

Es necesario tener presente que en este procedimiento el valor de C es válido sólo para $H < 0.25 S$, donde S representa la distancia desde el fondo del pozo hasta el estrato impermeable. Además, el valor así calculado representaría un promedio de la región del flujo.

En el anexo 2 (Métodos de terreno para determinar la conductividad hidráulica del suelo), se incluye mayor información en relación a como obtener este importante parámetro de diseño.

2.3 Espacio poroso drenable

Se entiende como espacio poroso drenable, aquel porcentaje de la porosidad total del suelo que es capaz de perder agua por el solo efecto de la gravedad, al actuar sobre un suelo originalmente saturado. Según esta definición, no es un parámetro difícil de determinar pero requiere de un laborioso procesamiento de muestras no disturbadas en laboratorio. Por lo tanto, puede transformarse en un proceso lento y de alto costo.

Como contrapartida a lo anterior, con fines prácticos es universalmente aceptado estimar el valor de la porosidad drenable a partir de ecuaciones, tablas y/o nomogramas como

los que se indican en el cuadro 2 y figuras 2 y 3. La ecuación más comunmente usada establece que el espacio poroso es :

$$\mu = \frac{\sqrt{K}}{100}$$

cuando K se expresa en cm/día.

No obstante lo anterior, es necesario destacar que un error de $\pm 25\%$ en la estimación de este parámetro puede significar un error de $\pm 10\%$ en el cálculo del espaciamiento. A pesar de ello, este autor opina que no se justificaría exigir mayor precisión en el cálculo de este parámetro, en la medida que se haya procedido adecuadamente en el cálculo de la conductividad hidráulica.

En esta forma el procedimiento para obtener el valor del espacio poroso drenable o rendimiento específico se simplifica considerablemente ya que resultaría directamente a partir del valor de K de diseño seleccionado.

Tabla 3. Valores de la porosidad drenable en relación con la textura y la estructura del suelo (*).

Textura drenable	Estructura	Porosidad drenable
Arcillosa	Columnar aglomerada	1-2%
Francoarcillosa densa	muy fina o fina	
Arcillosa	Prismática muy fina	1-3%
Francoarcillosa	o fina en bloques	
Arcillolimosas	angulares o laminar	
Franco arcilloarenosa		
Arcillosa	Prismática fina y	3-8%
Arcillolimosas	mediana en bloques	
Arcilloarenosa	angulares y laminar	
Franco arcillolimosas		
Francoarcillosa		
Francolimosas		
Limosa		
Franco arcilloarenosa		
Francoarcillosa poco densa	Prismática mediana	6-12%
Limosa	y en bloques sub-	
Francolimosas	angulares	
Francoarenosa muy fina		
Franca		
Francoarenosa fina	En bloques suban-	12-18%
Francoarenosa	gulares gruesos y	
	granular, migajón	
	fina	
Arenosa franca	Migajón mediana	15-22%
Arenosa fina	De grano suelto	
Arenosa mediana	De grano suelto	22-26%
Arenosa gruesa	De grano suelto	26-35%
Grava		

(*) Basado en datos del "Water and Power Resources Service" (anteriormente, "United State Bureau of Reclamation").

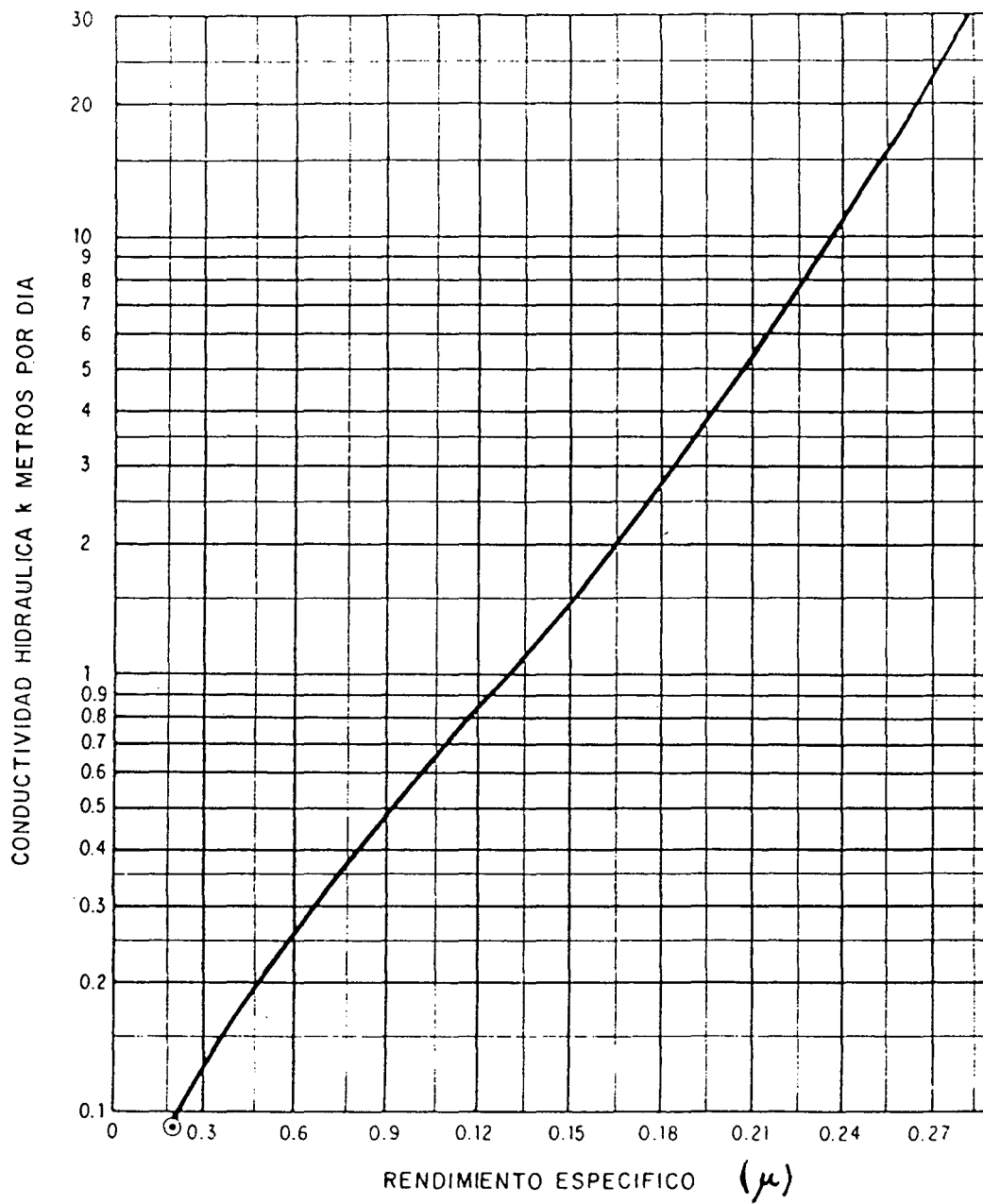


Figura 2. Relación general entre la porosidad drenable o rendimiento específico (μ) y la conductividad (K).

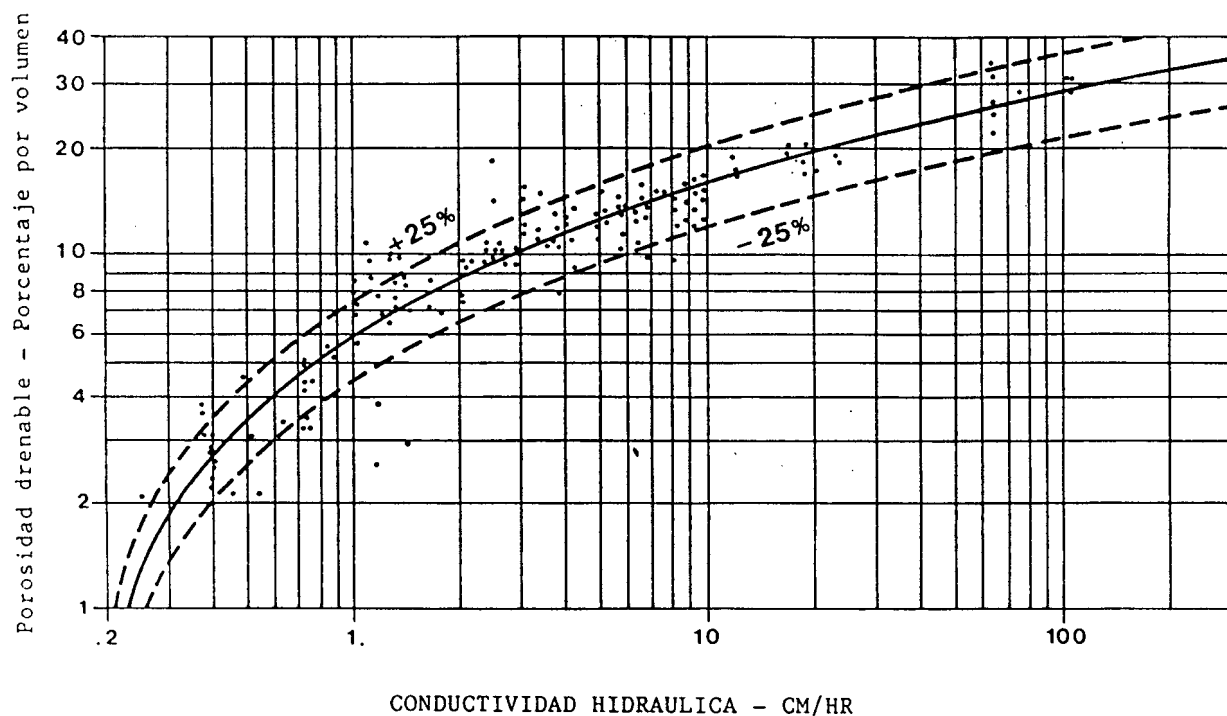


Figura 3. Relación general entre la porosidad drenable y la conductividad hidráulica. Determinada por "Water and Pocer Resources Service" (anteriormente United States Bureau of Reclamation) sobre la base de datos de distintas áreas del mundo.

III. CRITERIOS DE DISEÑO

Como ya se señaló, la definición de los "criterios de diseño" con fines de drenaje representa, sin lugar a dudas, el mayor inconveniente. Esto se debe a que para hacer una adecuada elección es requisito indispensable tener larga experiencia profesional en la materia, acabado conocimiento del área e información experimental de terreno que permita tomar las decisiones apropiadas.

Los dos primeros aspectos no son difíciles de lograr si se cuenta con el equipo de profesionales adecuados. Con respecto al tercer aspecto, en Chile prácticamente no existe información de terreno que permita respaldar una decisión y si la hubiere, lo más probable es que no corresponda a las condiciones locales donde se desea efectuar el proyecto. Resolver este problema pasa entonces por disponer de profesionales especialistas en la materia y por instalar estaciones experimentales y demostrativas para estudiar en terreno diferentes aspectos relativos al drenaje.

Como una forma de demostrar lo anteriormente indicado, es necesario señalar que una apropiada selección de los criterios de drenaje dependerá del siguiente conjunto de factores.

- a) Condiciones hidrológicas, las cuales determinan la cantidad de agua que debe ser drenada en un período específico de tiempo.
- b) Condiciones agronómicas, las cuales, dependiendo del cultivo y del suelo, determinan el límite de la zona radicular y el tiempo máximo que los cultivos pueden soportar condiciones de exceso de agua en la zona radicular.
- c) Condiciones del suelo, las cuales determinan las relaciones entre: aireación y contenido de humedad; nivel freático y contenido de humedad y nivel freático y ascenso capilar.
- d) Condiciones económicas, las cuales determinan las relaciones costo/beneficio y en consecuencia la conveniencia de tener o no un sistema de drenaje.

En drenaje, uno de los aspectos más complejos de determinar es la recarga de diseño. Se utiliza el término genérico de "recarga" para designar la cantidad neta de agua que será necesario extraer a través de la red de drenaje, luego de efectuado el balance hidrológico respectivo.

Para una correcta aplicación de este principio del balance hidrológico, sin embargo, se requiere un acabado conocimiento topográfico, hidrológico y geológico del área en estudio, de modo de poder identificar en forma exacta desde donde provienen y hacia donde se dirigen todas las aguas que entran y salen del sistema. Si la figura 4 fuese representativa de un área donde se pretende aplicar este principio, la ecuación general de balance sería:

$$E - S = \Delta W$$

donde : E = cantidades de agua que entran al sistema
S = cantidades de agua que salen del sistema
 ΔW = cambios en el almacenamiento del sistema

a) Entradas de agua

Per : percolación de agua (riego o lluvia) a través de la zona no saturada hasta la saturada

Qinf : infiltración desde canales o esteros ubicados en una posición más alta que la napa

Qas : filtración ascendente desde capas más profundas debido a una mayor carga hidráulica

Qen : filtración lateral que entra al sistema

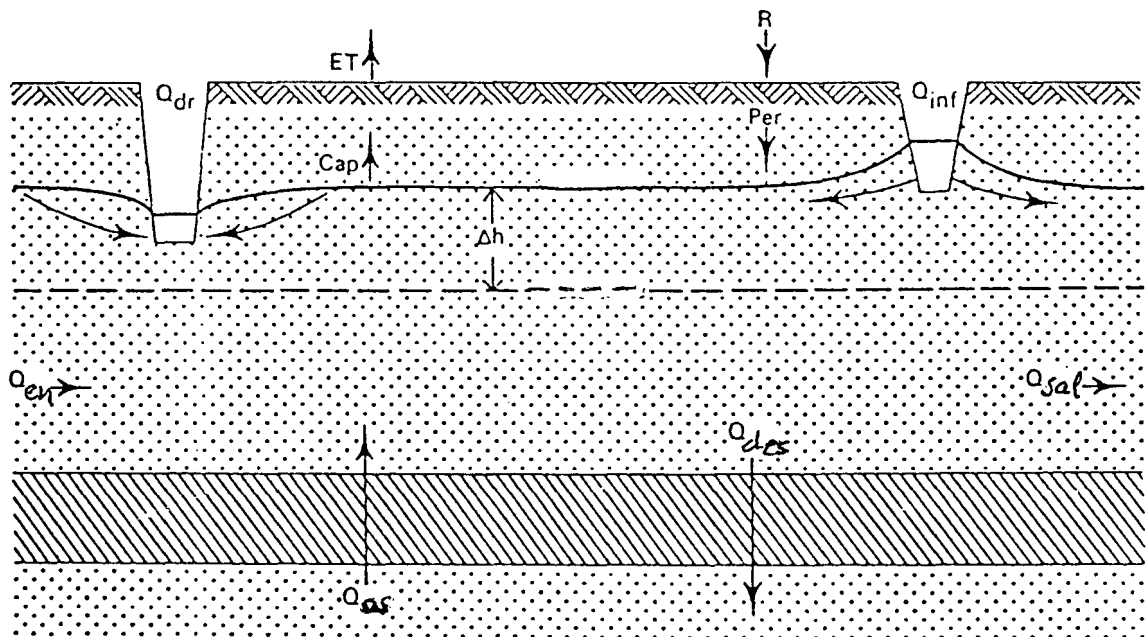


Figura 4. Representación esquemática de un área con problemas de drenaje, indicando los diferentes componentes de la ecuación de balance.

b) Salidas de agua

Cap : ascenso capilar desde la napa, pasando a través de la zona no saturada, hasta la superficie del suelo donde se pierde por evapo(transpi)ración.

Qdr : escorrentía hacia esteros o drenes, cuyo nivel de agua se encuentra más bajo que el nivel freático

Qdes : filtración descendente a través de una estrata semipermeable debido a una mayor carga hidráulica

Qsal : caudal de salida lateral del sistema

c) Almacenamiento

ΔW : cambios en la cantidad de agua subterránea almacenada debido a ascensos a disminuciones del nivel freático

La ecuación de balance de la zona zaturada quedaría expresada entonces de la siguiente forma :

$$(Per + Q_{inf} + Q_{as} + Q_{en}) - (Cap + Q_{dr} + Q_{des} + Q_{sal}) = \Delta W$$

o bien :

$$(Perc - Cap) + (Q_{inf} - Q_{dr}) + (Q_{as} - Q_{des}) + (Q_{en} - Q_{sal}) = \Delta W$$

Mas aún, obsérvese que dicha ecuación puede complicarse considerablemente si a lo anterior se agregan situaciones dadas por extracción de agua mediante pozos, importaciones y exportaciones de agua al sistema.

No obstante lo anterior y lo complejo que pudiera resultar la solución de la ecuación de balance, es necesario recalcar y sostener que la única forma de conocer exactamente los volúmenes de agua que entran y salen del sistema, es mediante la determinación de cada factor indicado en la ecuación. La determinación de la mayoría de ellos no ofrece grandes complicaciones y existen metodologías que permiten obtener los datos deseados. Sin embargo, para ello se requerirá una cantidad de información que no siempre se encuentra disponible y un conocimiento detallado del comportamiento hidrodinámico del área en estudio lo cual, seguramente, está más allá de lo que se espera encontrar en un proyecto como los que se presentan a los concursos de la Ley 18.450.

Considerando las marcadas diferencias climáticas que existen en Chile y con el propósito de simplificar y estandarizar la ejecución de proyectos por parte de los consultores y de simplificar la labor de corrección de los mismos por parte de la Comisión Nacional de Riego, se podría proceder de la siguiente manera :

1. Identificar a priori zonas geográficas del país donde la recarga se supone como producto del riego, donde lo es por lluvia y donde eventualmente puede ser de uno u otro tipo.
2. Proponer procedimientos de cálculo para ambas situaciones asumiendo tanto condiciones de regimen permanente como impermanente.
3. En aquellos lugares en que la recarga puede ser tanto por lluvia o riego, el consultor debería realizar ambos cálculos y luego justificar el valor que utilizará con fines de diseño.

Hay que tener presente, sin embargo, que la proposición anterior es una grosera simplificación de un problema de suyo complejo y no fácil de resolver. Consecuentemente, es probable que muchas situaciones locales escapen a un esquema de este tipo y en tal caso el consultor debiera entregar un completo cálculo de la ecuación de balance para justificar su elección.

Como una forma de contribuir a la solución de este complejo problema, en los párrafos siguientes se hace una propuesta para la determinación de las recargas para la estación de riego, la estación de lluvias y bajo condiciones de filtraciones laterales.

3.1. Recarga

3.1.1. Criterios para la estación de riego

Simplificando la situación planteada en la figura 4, es posible afirmar que durante la temporada de riego la recarga al sistema proviene fundamentalmente de tres fuentes : filtración de canales, filtración subterránea de suelos ubicados en una cota superior al del área en estudio y percolación profunda debido a malas técnicas de riego. El caso particular de la solución a un problema de drenaje cuya causal son las filtraciones, se analiza separadamente en el punto 3.1.3.

La cantidad de agua efectivamente aplicada a un cultivo, es decir, la tasa de riego o más propiamente la evapotranspiración devida por la eficiencia de riego, puede descomponerse en tres partes : la que queda almacenada en la zona radicular, la que escurre y la que percola. Con fines de drenaje subsuperficial sólo es importante la cantidad que se pierde por percolación profunda, ya que es la que contribuye a elevar la napa freática.

Un estudio realizado por FAO (1985) sugiere utilizar la siguiente tabla, a partir de la cual es posible determinar

las pérdidas por percolación (en porcentaje), conocido el método de riego y la eficiencia de aplicación.

Tabla 4. Estimación de las pérdidas por percolación profunda en relación con la eficiencia de aplicación del agua, el método de riego y el tipo de suelo.

Métodos de riego	Procedimientos de aplicación	Eficiencia de aplicación de agua		Percolación profunda media como porcentaje del agua de riego aplicada al terreno	
		Textura del suelo			
		denso	poco denso	denso	poco denso
Aspersión	* aplicación diurna, viento moderadamente fuerte	60	60	30	30
	* aplicación nocturna	70	70	25	25
Por goteo		80	80	15	15
Por inundación	* mal nivelado	60	45	30	40
	* bien nivelado	75	60	20	30
Por surco o bordes	* mal nivelado	55	40	30	40
	* bien nivelado	65	50	25	35

Fuente : FAO, 1985.

Puesto que en el reglamento de la Ley 18.450 (Art. 10) se especifica claramente cuales son, las eficiencias que deben emplearse para el cálculo de los requerimientos de riego, la aplicación de la tabla es sumamente fácil, haciendo las interpolaciones respectivas.

Estudios de eficiencia de riego realizados por el Departamento de Riego y Drenaje de la Universidad de Concepción en la VII y VIII Regiones, indican que en caso de riego gravitacional, del total del agua no almacenado en la zona radicular, aproximadamente un 60% se pierde por percolación profunda y otro 40% lo hace por escorrentía superficial.

En consecuencia, a partir de los datos de eficiencia señalados en el Art. 10 del reglamento de la Ley 18.450, una forma simplificada de obtener la altura de agua que contribuye a la elevación de la napa freática como producto de la percolación profunda, es asumiendo los siguientes valores.

Método de Riego	Efic. Aplicación (%)	Perc. Profunda (%)
Tendido	30	28
Surcos	45	22
Bordes de controno	50	20
Bordes (conducción californiano)	65	14
Bordes rectos	60	16
Pretilles	60	16
Tazas	65	14

3.1.2. Criteros para la estación de lluvias

Para la formulación de los criterios de drenaje en invierno, el primer paso consiste en determinar la magnitud de la recarga. Para ello hay que conocer el regimen de intensidad y frecuencia de la lluvia y a continuación determinar la fracción de la precipitación que da lugar a la percolación profunda. Este procedimiento es así puesto que, al igual que con el agua de riego, parte de la lluvia escurre superficialmente y parte queda almacenada en la zona no saturada.

a) Lluvia de diseño

Determinar la lluvia de diseño implica el análisis probabilístico de series de datos de lluvia para dar origen a curvas altura-frecuencia-duración. No obstante, que las bases técnicas omiten especificar como realizar dicho análisis, se indica claramente que éste debe hacerse para duraciones de 1, 2 y 3 días consecutivos y para periodos de retorno no inferiores a 5 años.

b) Percolación

Este dato puede obtenerse a partir de las curvas altura-frecuencia-duración, donde en el eje de las ordenadas se ubica el punto correspondiente a la capacidad de

almacenamiento del suelo sobre el nivel freático. Este procedimiento se ilustra en la figura 5. Los pasos a seguir son :

- * Ubicar la capacidad de almacenamiento del suelo en el eje y
- * Trazar una tangente a las curvas de duración a partir del punto anterior una vez decidido el período de retorno
- * La tangente representa una aproximación de la capacidad de descarga que debe tener el sistema
- * La abscisa del punto de tangente representa la duración de la lluvia de diseño

Será responsabilidad del consultor determinar la cantidad de agua de lluvia que el suelo es capaz de almacenar antes que se produzca percolación. Para tal efecto es necesario considerar que la profundidad de suelo que retiene agua es aquella que se encuentra por sobre la región del flujo.

3.1.3. Criterios para filtraciones laterales

Como se indicó anteriormente, cuando la recarga a un área es consecuencia de filtraciones desde un canal, río, estero o

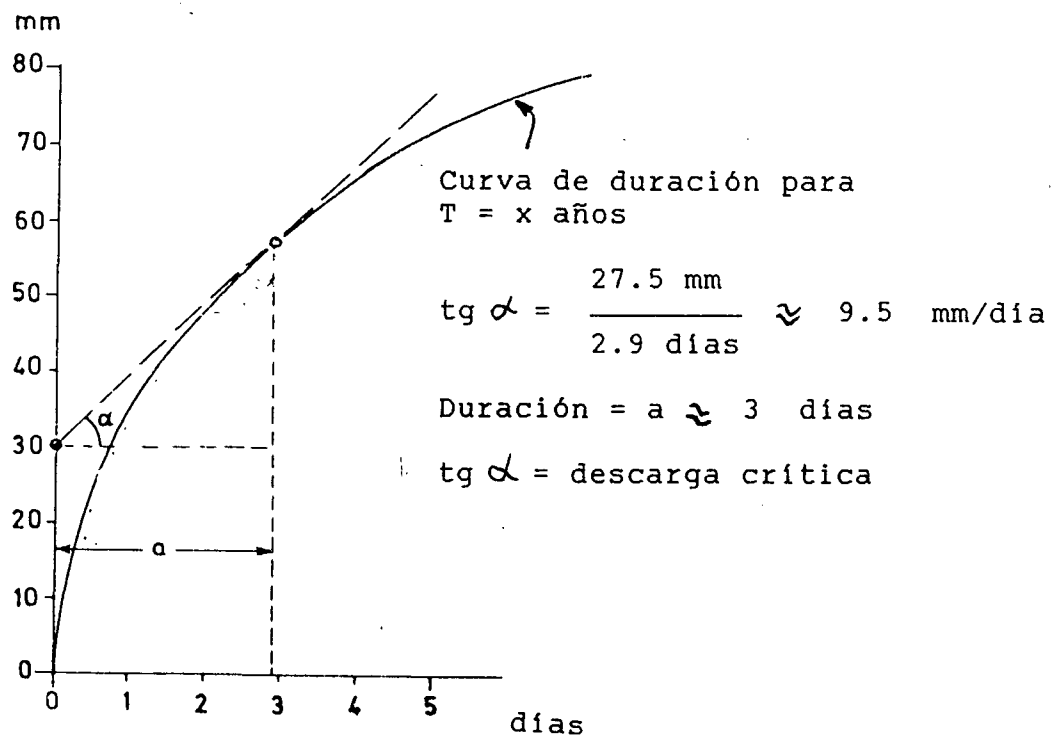


Figura 5. Curvas de duración de la lluvia y capacidad de descarga estimada del sistema cuando el almacenamiento es de 30 mm.

terrenos ubicados en una posición más alta, la solución al problema pasa por la construcción de un dren interceptor y no un sistema de drenes laterales paralelos.

En términos generales, la teoría indica que el diseño de un buen dren interceptor consiste en :

- a) Determinar exactamente de donde proviene la filtración, la cual puede ser superficial o subterránea.
- b) Si la filtración es superficial, es fácilmente detectable y bastará calcular la escorrentía mediante algunos de los procedimientos hidrológicos habituales para determinar el caudal máximo que debe ser capaz de conducir el interceptor.
- c) si la filtración es subterránea será necesario determinar:
 - * la naturaleza y dirección del flujo
 - * la cantidad de agua que se mueve subsuperficialmente
 - * la profundidad del estrato conductor (profundidad del estrato impermeable)

En este último caso, el interceptor podrá ser una zanja abierta a un dren estubado. A mayor profundidad, mayor intercepción, llegando al 100% si el dren alcanza el estrato impermeable. En cualquier caso, será posible determinar la altura que el nivel freático alcanza agua abajo del dren, el cual dependerá del caudal no interceptado, y la distancia aguas arriba hasta adonde alcanza su efectividad.

Para determinar la cantidad de agua que se mueve, será indispensable disponer una red de pozos de observación que permita trazar las líneas de isoprofundidad del nivel freático. Conocidas dichas líneas y la conductividad hidráulica del suelo, el caudal que fluye se puede calcular mediante simple aplicación de la ecuación de Darcy.

En el caso específico de filtración desde canales, es posible estimarla a partir de nomogramas como el indicado en la figura 6. Asimismo, las pérdidas de un canal se pueden obtener numéricamente mediante la aplicación de algunas de las siguientes relaciones :

$$P = \frac{Q_o - Q_f}{Q_o * L}$$

$$P = \frac{1}{L} \ln \frac{Q_f}{Q_o}$$

$$P = 1 - \sqrt{\frac{Q_f}{Q_o}}$$

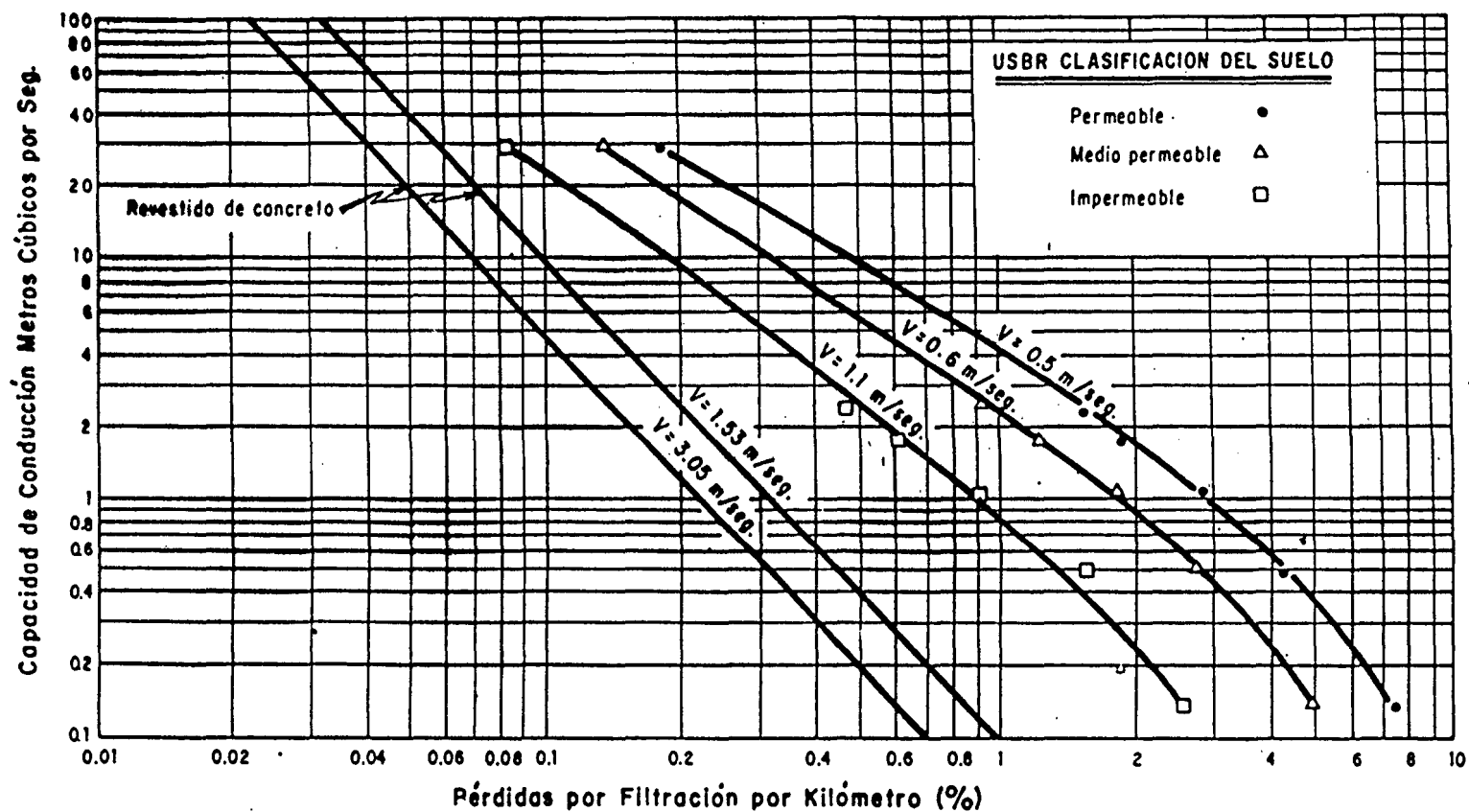


Figura 6 - FILTRACION DEL CANAL v.s. CAPACIDAD DE CONDUCCION

donde =

Q_0 = caudal inicial (m³/seg)

Q_f = caudal final (m³/seg)

L = largo del tramo (m)

P = pérdidas (% por unidad de largo)

3.2. Profundidad de la napa

Este es un criterio de diseño de base netamente agronómica y está determinada por las características de arraigamiento de los cultivos y la sensibilidad que estos mismo tengan al exceso de agua y en consecuencia al efecto que esta situación produzca sobre los rendimientos.

Cuando en drenaje se habla de profundidad óptima o efectiva, se entiende que es aquella profundidad a la cual puede encontrarse la napa freática sin que los cultivos presenten serias disminuciones en los rendimientos. Como se indica en la tabla siguiente, ésta profundidad efectiva no debe confundirse con la profundidad máxima, la cual puede ser considerablemente mayor.

Tabla 5. Características de arraigamiento de algunos cultivos (cm).

Especie	Máx.profundidad radical (1)	Arraigamiento activo (2)	Extensión lateral
Espárrago	320	135	180
Avena	200	150	25
Remolacha	180	120	45
Alfalfa	610	300	15
Porotos	120	90	75
Papas	150	90	40
Trigo	225	180	35
Maíz	188	180	100

(1) Profundidad máxima de observación de raíces

(2) Profundidad de desarrollo de la mayor parte del sistema radicular (Zona de mayor absorción).

Fuente: Honorato, R. 1993.

Como queda demostrado al comparar la tabla anterior con las que se indican a continuación, diversos autores tienen también diversas opiniones en cuanto a la profundidad que alcanzan las raíces de los cultivos. Esto hace relativamente difícil decidir que criterios utilizar.

Tabla 6. Profundidad de arraigamiento de algunos cultivos.

Arraigamiento superficial (<60cm)	Arraigamiento medio (60-90cm)	Arraigamiento profundo (>90cm)
Arvejas	Ají	Alfalfa
Apio	Betarraga	Alcachofa
Cebolla	Cereales	Camote
Coliflor	Calabaza	Cerezo
Espinaca	Espárragos	Cítricos
Frutilla	Habas	Frutales de
Lechuga	Maíz	hoja caducada
Maravilla	Nabo	en general
Poroto	Pepino	Melón
Pimiento	Porotos verdes	Olivo
Papas	Remolacha	Palto
Repollo	Sandía	Sorgo
Trébol ladino	Tomate	Tabaco
Trébol blanco	Trébol rosado	vid
	Zanahoria	
	Zapallo	

Fuente : Honorato, R. 1993.

Tabla 7. Profundidad de arraigamiento de algunas especies frutales. (Encuesta a especialistas. Se considera que ninguna otra propiedad del suelo es limitante).

Especie	Umbral limitante (1)	Requerimiento óptimo
Cítricos	40	80
Ciruelo	50	100
Vid	30	60
Duraznero	45	80
Peral	50	100
Manzano	40	100

(1) Bajo el umbral el rendimiento sería afectado al menos en 30%.

Fuente : Honorato, R. 1993.

Tabla 8. Profundidad de arraigamiento de algunos cultivos.

Cultivo	Profundidad de las raíces (m)	
	Principal	Máxima
Alfalfa	0.90-1.80	3.00-4.50
Avena	0.50-0.90	1.20-1.50
Cebolla	0.60-0.90	1.50
Lechuga	-	0.40-0.50
Papas	0.30-1.00	1.00
Porotos	0.30-0.75	0.90
Maravilla	0.30-0.90	2.70
Remolacha	0.30-1.20	1.50-1.80
Tomate	0.60-0.90	1.20
Trigo	0.30-0.90	1.20-1.50

Fuente : Catálogo tuberías drenaflex. Industrias Tehmco S.A.

Enfrentado a la complejidad que significa decidir entre las alternativas indicadas en las tablas precedentes, un criterio ampliamente utilizado es el propuesto por FAO (1985), el cual se indica en las tablas siguientes para condiciones de régimen permanente e impermanente.

Tabla 9. Profundidades de la napa freática sugeridas en temporada de riego para proyectar el espaciamiento de drenes mediante las fórmulas de regimen permanente.

Cultivos	Profundidad de la capa freática en metros por debajo de la superficie del terreno	
	Suelo de textura fina (permeable)	Suelo de textura poco densa
Cultivos extensivos	1,2	1,0
Hortalizas	1,1	1,0
Cultivos arbóreos	1,6	1,2

Fuente : FAO, 1985.

Tabla 10. Profundidades de la napa freática sugeridas en temporada de riego para proyectar el espaciamiento de drenes mediante las fórmulas de regimen impermanente.

Cultivos	Profundidad de la capa freática en metros por debajo de la superficie del terreno	
	Suelo de textura fina (permeable)	Suelo de textura poco densa
Cultivos extensivos	0,9	0,9
Hortalizas	0,9	0,9
Cultivos arbóreos	1,4	1,1

Fuente : FAO, 1985.

Cuando el suministro de agua es muy irregular o las prácticas de riego muy deficientes se sugieren los siguientes valores.

Tabla 11. Profundidad de la napa (m) en el punto medio entre drenes.

Cultivos	Régimen	
	Permanente	Impermanente
Extensivos	1.4	1.2
Hortalizas	1.3	1.1
Frutales	1.6	1.4

Fuente : FAO, 1985.

Otro procedimiento es el sugerido por Oosterbaan (1992) y que se expresa en la tabla siguiente :

Tabla 12. Profundidad media del nivel freático para diferentes cultivos en función de la textura.

Cultivos	Textura		
	Arena	Franco	Arcilla
Praderas	0.5	0.6	0.7
Cereales	0.6	0.7	0.8
Cultivos forrajeros	0.7	0.8	0.9
Cultivos de raíz, tubérculos, fibra, aceites y hortalizas	0.8	0.9	1.0
Frutales, árboles	1.0	1.2	1.4
Suelos barbechados con alza capilar con sales	1.2	1.5	1.3

Fuente : Oosterbaan, 1988.

De la lectura de los cuadros anteriores se desprende que es absolutamente necesario recabar la opinión de especialistas en la materia para definir con mayor exactitud y para nuestras propias condiciones, cuáles serían las profundidades óptimas que deben considerarse con fines de diseño de drenes.

Otro concepto importante en materia de cultivos, es referente a la sensibilidad que estos tienen al exceso de agua y el tiempo máximo que son capaces de soportar bajo condiciones de saturación. Este concepto es particularmente importante si al momento de determinar el espaciamiento entre drenes bajo una condición de régimen permanente, se permite que la zona radicular sea saturada y se requiere extraer el agua en un tiempo dado antes que se presenten daños por falta de oxígeno.

En relación a los frutales, Honorato (1993) establece que estos pueden clasificarse en cinco grupos, según sus requerimientos de drenaje (Tabla 13). El grupo I representa el requerimiento más alto y el grupo V el más bajo. Asimismo, el orden de precedencia dentro de cada grupo indica que la necesidad de drenaje disminuye en sentido descendente.

Tabla 13. Requerimiento de drenaje de algunos frutales.

Grupo	Frutales
I	Almendros Duraznero Palto Chirimoya
II	Damasco Nogal Manzano Olivo
III	Higuera Cítricos Ciruelo Peral
IV	Vid
V	Membrillo

Fuente : Honorato, 1993.

Según Valenzuela (1994) los frutales más tolerantes al exceso de agua son los drupáceos (los que tienen carozo y hojas caducas), seguidos de las pomáceas (manzanos y peras), luego los cítricos y finalmente el palto como una de las especies más susceptibles. Entre las drupáceas el menos tolerante es el damasco y el más tolerante el ciruelo. También afirma que las hortalizas perennes, tales como los ruibarbo, los espárragos y las alcachofas toleran saturación del suelo hasta dos o tres días. Entre las hortalizas menos tolerantes opina que están el frejol y la papa.

No existen suficientes antecedentes en la literatura que permiten clasificar las especies según su grado de sensibilidad al exceso de agua. No obstante lo anterior, a modo referencial podría establecerse el siguiente ordenamiento:

----- Especies	Tolerancia máxima (días) -----
Hortalizas anuales (frejol, papa, lechuga) frutilla, frambuesa, palto	< 2
Hortalizas perennes, (espárragos, alcachofas) Frutales pomáceos, maiz, remolacha, kiwi	2-3
Cereales, frutales drupáceos (durante período invernal), alfalfa	3-4
Praderas permanentes, tréboles, festucas peral, membrillo	4-6
-----	-----

Lo anterior debe considerarse sólo con carácter referencial. La única forma de tener claridad al respecto es haciendo las investigaciones que el caso requiere.

3.3. Carga hidráulica

Para el cálculo del espaciamiento entre drenes bajo condiciones de régimen permanente, donde la recarga es igual a la descarga, se requiere que exista una cierta carga

hidráulica (Δh) por sobre la línea del nivel de agua entre los drenes (ver figura 1, pag 28, de Boletín de Extensión N°47). Dicha carga hidráulica es la responsable que el agua, se mueva hacia los drenes.

No existen antecedentes suficientemente poderosos que permitan recomendar un valor único de carga hidráulica. FAO (1985) sugiere determinarla en base a un valor residual de 0.1 m más el 50 o 100 por ciento de ascenso del nivel freático producido por una recarga instantánea según se trate de regiones permanente o impernente, respectivamente (ver sección 3.4).

Es necesario tener presente que, en teoría, en la medida que aumente el valor de la carga hidráulica el flujo hacia los drenes debiera ser más eficiente y rápido por cuanto aumenta el gradiente hidráulico. En otras palabras, pareciera conveniente utilizar valores lo más grandes posible. Sin embargo, como se verá en el punto siguiente, ello incide directamente sobre la profundidad de los drenes y por tanto sobre los costos.

Considerando ambas circunstancias y con el propósito de simplificar al máximo este tipo de cálculos, parece conveniente recomendar cifras únicas. La experiencia

profesional indica que este valor puede fluctuar entre 0.2 y 0.3 m.

3.4. Profundidad de los drenes.

La profundidad mínima de los drenes para el control del nivel freático dependerá de las condiciones de régimen de flujo que se consideren para el cálculo del espaciamiento. Según FAO (1985) esta profundidad mínima deberá ser el valor máximo resultante de las profundidades calculadas según el siguiente procedimiento :

a) Bajo condiciones de régimen permanente, la profundidad mínima de los drenes deberá ser igual a la suma de las siguientes distancias :

- * La profundidad efectiva seleccionada (cuadro 12)

- * El 50% del ascenso del nivel freático producido por la recarga individual máxima ocasionada por una aplicación local de agua

- * Un valor residual de carga hidráulica de 0.1 m

b) Bajo condiciones de régimen impermanente, la profundidad mínima de los drenes estará dada por :

- * La profundidad efectiva seleccionada (Cuadro 12)

* El 100% del ascenso del nivel freático producido por la recarga individual máxima debida a una aplicación local de agua

* Un valor residual de carga hidráulica de 0.1 m

Otro método para determinar la profundidad mínima bajo tales condiciones de régimen, consiste en utilizar el balance hidrodinámico para todo el año, manteniendo el nivel máximo de la napa por debajo del nivel de profundidad efectiva seleccionado. Este concepto corresponde a una forma específica de solución de una ecuación para régimen impermanente y por tanto no procede tratarlo en este informe.

En opinión del autor, como una forma de simplificar este cálculo y si aceptamos un valor de 0.2 a 0.3 m de carga hidráulica, la profundidad de los drenes bajo condiciones de régimen permanente puede ser simplemente :

$$P_d = P_e + \Delta h$$

donde : P_d = profundidad del dren

P_e = profundidad radicular efectiva

Δh = carga hidráulica

IV. ESTUDIO DE NIVELES FREATICOS

Como se indicó en párrafos anteriores, el estudio de niveles freáticos es un aspecto fundamental en la planificación, diseño y posterior construcción de un sistema de drenaje. Este es uno de los estudios de terreno más importantes por cuanto permite :

- a) Determinar el grado, extensión y naturaleza de los problemas de drenaje existentes o potenciales.
- b) Analizar el sistema y balance de aguas subterráneas a partir del cual el origen del problema de drenaje puede ser interpretado y comprendido.
- c) Indicar como el sistema puede ser alterado artificialmente de modo que el nivel freático resultante no cause daño a los cultivos.

En opinión del autor de este trabajo, y considerando la relevancia que este tipo de estudios tiene, éste aspecto ha sido descuidado en la definición de las bases técnicas de los Proyectos que se presentan a los concursos de la Ley 18.450, dejándose a criterio de los consultores ciertos procedimientos que, por lo contrario, debieran estar claramente estipulados y exigidos. Es conveniente insistir en

que descuidado este aspecto puede conducir a falsas interpretaciones del problema existente y consecuentemente dar lugar a plantear soluciones que sólo logren soluciones parciales o peor aún, que no constituyan solución ninguna, con el consiguiente despilfarro de tiempo y dinero.

Tomando en consideración tales afirmaciones, a continuación se hacen algunos alcances referente a los aspectos más relevantes y característicos que debiera tener cada etapa de un estudio de niveles freáticos.

4.1. Recolección de datos

En relación a este aspecto, se sugiere :

- a) Proponer una densidad de pozos de observación concordantes con lo señalado en el punto 2.2 (Conductividad hidráulica). En esta forma los pozos construidos pueden servir para un doble propósito.
- b) En teoría, el lapso mínimo de tiempo durante el cual deben ejecutarse las lecturas debe ser de un año hidrológico, con una frecuencia de lecturas no inferior a una al mes. Puesto que ésto es altamente desincentivador para los interesados en realizar proyectos de riego, debiera

recomendarse que las lecturas se realicen a lo menos durante toda la temporada de riego o lluvias, según sea el origen de la recarga.

- c) En caso de aceptarse el punto anterior, la frecuencia de lectura debiera ser una al mes y además una luego de un evento hidrológico especial (riego profundo, lluvia muy intensa, inicio temporada de riego, elevación excepcional del agua en canales o esteros, etc.).
- d) La red de pozos de observación debiera extenderse algunos cientos de metros fuera del área de estudio del proyecto para poder determinar el efecto de situaciones ajenas al área misma.

4.2. Procesamiento de datos

Parece insuficiente que se exija solo un plano de isolíneas del nivel freático. Este solo permite conocer cuales son las áreas que tienen el nivel freático a una cierta profundidad. A mi juicio debiera pedirse además :

- a) Plano de isohipsas o plano de equipotenciales.
- b) Confección de a lo menos dos histogramas en otros tantos

pozos de observación estratégicamente ubicados dentro del área de estudio.

4.3. Evaluación de datos

El procesamiento de datos solicitado en el punto anterior permitiría :

- a) A partir del plano de isolíneas determinar las áreas con mayor o menor problema y consecuentemente determinar la magnitud del problema y su distribución espacial.
- b) A partir del plano de equipotenciales, determinar las áreas de recarga, descarga y el flujo y dirección del agua subterránea.
- c) A partir de los histogramas, determinar las fluctuaciones del nivel freático y por lo tanto conocer a partir de que época del año el problema es crítico para la planta.

V. CALCULO DEL ESPACIAMIENTO

La literatura menciona un considerable número de ecuaciones que han sido desarrolladas por diferentes investigadores en diferentes partes del mundo. Todas ellas con una fuerte base física pero que sólo representan idealizaciones de posibles situaciones de terreno deficientes, si no imposibles, de encontrar en la naturaleza. Dichas ecuaciones han sido derivadas tanto para condiciones de régimen permanente como impermanente.

De acuerdo a una encuesta realizada por FAO ante numerosos especialistas en el mundo entero, fue posible concluir que :

"El uso de las ecuaciones para régimen permanente o impermanente es en gran medida una opción personal. Como resultado de una larga experiencia utilizando ecuaciones para régimen permanente, son muchos los proyectistas que siguen utilizandolas indistintamente para cualquier condición. El uso actualmente creciente de las ecuaciones para régimen impermanente se debe fundamentalmente a la disponibilidad de nuevas técnicas de cálculo, que facilitan la aplicación de tales métodos, más que a una conveniencia de tipo técnico".

La experiencia ha demostrado, además, que la única forma de tener respuestas confiables en relación al espaciamiento

entre drenes es establecer áreas piloto en todos aquellos lugares donde se desea realizar proyectos de drenaje y allí experimentar diversas alternativas de espaciamiento, materiales envolventes, tuberías, etc., y seleccionar aquella que mejor satisface las condiciones imperantes. En otras palabras, el cálculo del espaciamiento mediante el uso de fórmulas debe considerarse sólo como de tipo referencial, independientemente de la precisión matemática que se obtenga en la solución de las mismas.

No obstante lo indicado en los párrafos procedentes, a continuación se mencionan algunas de las ecuaciones más ampliamente utilizadas y que podrían sugerirse utilizar bajo las condiciones de regimen que se indican.

a) Régimen Permanente

- | | | | |
|------|---------------------|---|--------------------|
| i. | Suelo homogéneo | - | Ecuación USDA-SCS |
| ii. | Suelo dos estratas | - | Ecuación Hooghoudt |
| iii. | Suelo tres estratas | - | Ecuación Ernst |

b) Régimen Impermanente

- | | | |
|-------------------------------|---|-------------------------------------|
| Suelo homogéneo y heterogéneo | - | Ecuación Glover y Dumm (USDA - SCS) |
| | - | Ecuación de Boussinesq |

No obstante no ser teóricamente correcto, se sugiere el uso de las ecuaciones de Glover y Dumm y Boussinesq, tanto para

suelos homogéneos como heterogéneos, en atención a que no existen soluciones simples y prácticas para resolver la segunda situación.

Por otra parte, es necesario tener presente que las ecuaciones de K.van de Leur y la modificada por De Zeeuw, comúnmente usadas por los consultores, no fueron derivadas para el cálculo del espaciamiento sino para obtener las fluctuaciones del nivel frático bajo condiciones de un cierto patrón de lluvias que origina la descarga. En otras palabras no es adecuada para condiciones de riego donde la recarga es instantánea.

En relación a este aspecto es necesario señalar, finalmente, que muchos sistemas de drenaje eficaces han sido proyectados en todo el mundo utilizando indistintamente ambos criterios (FAO, 1985; Ochs y Bishay, 1992). Las incertidumbres relativas a los supuestos básicos, la dificultad de determinar un valor representativo de la recarga, las variaciones de la conductividad hidráulica y del espacio poroso drenable, tanto espacial como temporalmente, hace que en definitiva ninguna de las alternativas propuestas sea perfecta, sino simplemente nos den un orden de magnitud de la variable.

VI. ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

La definición de los aspectos constructivos de un sistema de drenaje contempla las siguientes etapas : disposición de la red de drenes (laterales y colectores) en terreno; determinación de los caudales de descarga, determinación de diámetros y pendientes, uso de envolventes y finalmente la instalación en terreno propiamente tal.

6.1. Disposición de la red de drenaje

Toda red de drenaje esta integrada por: laterales o drenes de campo, colectores y drenes principales. El cálculo del espaciamiento está orientado hacia la determinación de la distancia a que debe instalarse un lateral de otro.

La disposición de la red de drenaje, por otra parte, se refiere a como se ubicarán tanto laterales como colectores en el terreno para que estos últimos puedan descargar en los drenes principales preferentemente ya existente (esteros, ríos o drenes artificiales de gran magnitud).

A esta altura del proyecto cobra relevancia e importancia, una vez mas, el exacto conocimiento de la topografía del terreno y la dirección del flujo subterráneo, por cuanto de

ello depende como se dispondrán los drenes laterales. Estos deberán instalarse, hasta donde sea posible, perpendiculares a la dirección del flujo.

Una vez decidida la ubicación de los laterales o drenes de campo se deberá determinar el largo que ellos tendrán y si descargarán en un colector de zanja o tubo. El primer aspecto depende a su vez de las condiciones topográficas, apotreramientos, tamaño de la propiedad y caudal de descarga. Por otra parte, la decisión de usar un colector entubado o zanja, dependerá del uso del suelo y caudal de descarga.

Puesto que no es posible establecer recomendaciones en este sentido, ambos aspectos deben quedar a criterio del consultor.

6.2. Caudales de descarga

El diseño hidráulico de una red de drenaje se basa en el cálculo de la descarga máxima que deben evacuar los drenes. Este cálculo se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$Q_{\max} = q * A$$

donde :

Q_{max} = caudal máximo (m³/día)

Q = caudal específico (m/día)

$A = E \cdot L$ = área drenada por cada lateral (m²)

E = espaciamiento (m)

L = largo del lateral (m)

Puesto que el área queda definida por el espaciamiento y el largo de los laterales, el problema radica en determinar el caudal específico. Este caudal específico depende del régimen imperante tal que :

a) Para condiciones de régimen permanente, el caudal específico es igual a la recarga.

Es decir :

$$q = R = \text{m/día}$$

b) Para condiciones de régimen impermanente, debe calcularse según las siguientes expresiones :

$$q = \frac{6.84 \text{ Kd}}{E^2} h_o \quad (\text{Glover y Dumm})$$

$$q = \frac{3.46 \text{ K}}{E^2} h_o^2 \quad (\text{Boussinesq})$$

La definición de las variables puede encontrarse en cualquier texto de drenaje.

6.3 Diámetros y pendientes

Es necesario tener presente que, desde el punto de vista hidráulico, existe una íntima e indisoluble relación entre caudal, diámetro y pendiente. Es posible distinguir dos casos:

- a) Si la tubería es lisa (arcilla, cemento y PVC liso) se recomienda resolver este problema según las fórmulas de Darcy-Weisbach, debido a que existe relación entre el factor de resistencia al flujo y el número de Reynolds.
- b) Si la tubería es corrugada (PVC corrugado), no hay relación entre el factor de resistencia al flujo y el número de Reynolds y en tal caso se recomienda resolver el problema a partir de la ecuación de Manning.

Los cálculos anteriores pretenden determinar la pendiente mínima que debe darse a la línea de tubos para neutralizar la resistencia natural que ésta opone al flujo. Las pendientes más usadas fluctúan entre el 1 y el 5 por mil. La FAO (1985) sugiere una pendiente mínima del 0.5 por mil. El Bureau of

Reclamation de Estados Unidos recomienda un mínimo de 1 por mil para evitar sedimentación. Otra recomendación es la que se incluye en la tabla siguiente :

Díametro de la tubería (mm)	Pendiente (%)	Velocidad de agua (m/s)
75	0.20	0.29
100	0.10	0.25
125	0.17	0.24
150	0.05	0.23

6.4. Envolventes

En este sentido es pertinente establecer lo siguiente :

a) Todos los drenes ubicados en suelos hidráulicamente inestables requieren de un material envolvente alrededor de la tubería.

consid

b) Todos los suelos de origen aluvial, casi independientemente de su textura, son inestables.

c) Los suelos que tienen un importante contenido de arcilla (probablemente mayor al 25-30%) son los únicos que no requieren envolventes. En todo caso será conveniente

realizar algunas pruebas previas para determinar si ello efectivamente es así en cada caso particular.

- d) No existe en Chile mayor experiencia que permita recomendar el mejor envolvente para una determinada condición. Los resultados que pueden obtenerse en uno y otro caso son muy diferentes dependiendo del material y tubería empleados. Unos tienden a privilegiar mayor caudal y otros tienden a privilegiar un mayor filtrado. Bajo condiciones de mayor caudal la resistencia de entrada disminuye y bajo condiciones de mayor filtrado la resistencia de entrada aumenta. Se adjunta una publicación en que se hace referencia a este aspecto para ilustrar lo afirmado (Anexo 4).

Para seleccionar envolventes granulares se podría sugerir el método propuesto por el ex Bureau of Reclamation (USBR) el cual se basa en un análisis de la distribución del tamaño de partículas tanto del suelo como del envolvente. Esto, sin embargo, puede ser engorroso, poco práctico y de alto costo. Es por lo tanto preferible privilegiar la investigación local para entregar recomendaciones prácticas a corto plazo.

6.5. Instalación de drenes

A juicio del autor de este informe, éste es uno de los aspectos más críticos que pudieran estar influyendo en el buen comportamiento de los sistemas de drenaje que se han instalado en el país. Si no existe una depurada técnica de instalación de los drenes en terreno, todo el esfuerzo que se pudiera haber puesto en la determinación de los parámetros y criterios de diseño puede verse malograda en la fase final.

La falta de maquinaria especializada para instalar drenes y el uso masivo de retroexcavadoras para construir las zanjias puede acarrear problemas de alineamiento, gradientes negativos y eventual ruptura de las tuberías por inadecuada manipulación.

Dada la complejidad de este problema pareciera que no existe otra solución que esta etapa sea realizada por empresas especializadas y con personal entrenado. Esta idea, sin embargo, parece incompatible con un sistema en el cual la libre competencia determina quien realiza el trabajo.

VII. RECOMENDACIONES

1. En relación a los estudios de suelos que señala el reglamento de la Ley 18-450, se sugiere :

a) Solicitar la separación del suelo en base a "estratos" (agrupación de horizontes hidrodinámicamente similares).

b) Exigir la determinación de la profundidad del estrato impermeable y su presentación mediante perfiles longitudinales y transversales del área en estudio.

2. En relación a la conductividad hidráulica del suelo, se debiera recomendar :

a) Sólo determinaciones de terreno (con o sin napa freática presente).

b) Exigir un número mínimo de determinaciones por unidad de superficie, según lo que se indica en la tabla de la página 8. A partir de dicha información debe generarse un plano de "rangos de conductividad".

c) Si el suelo es homogéneo, realizar una determinación aproximadamente en el punto medio de la región del

flujo. Se entiende por región de flujo, la distancia desde el punto medio del nivel freático entre dos drenes, hasta el estrato impermeable.

d) Si el suelo es heterogéneo, una determinación por cada estrata comprendida dentro de la región de flujo.

e) Cuando no sea posible hacer determinaciones dentro de un estrato aluvial, el valor mínimo aceptable será de 10 m/día.

3. Una vez seleccionado el valor de la conductividad hidráulica de diseño, el espacio poroso drenable o rendimiento específico puede obtenerse a partir de la figura 2 o la ecuación indicada en la página 13. Ambos procedimientos dan valores relativamente similares.

4. Para los efectos de determinar las pérdidas por percolación profunda, se sugiere el siguiente procedimiento:

a) Si se trata de excedentes de riego, usar la tabla que se incluye en la página 26. Una versión mejorada de este mismo principio es el indicado en la tabla 4.

b) Si se trata de excedentes de lluvia, utilizar la curva de duración calculada para el período de retorno deseado y luego proceder según se indica en el punto 3.1.2. y figura 5.

5. En caso de proyectos donde exista la sospecha de posibles recargas por filtración lateral, que amerita la construcción de un dren interceptor, el procedimiento a seguir podría ser el siguiente :

a) A petición del interesado o del consultor que realizará el proyecto, un profesional autorizado por la Comisión Nacional de Riego visitará la zona problema y por simple observación visual o inspección de algunos pozos o calicatas, determinará si existe o no recarga lateral.

b) Si efectivamente se determina que el problema de drenaje del área es producto de una recarga lateral, deberá procederse a la investigación de terreno necesaria para determinar el origen y cantidad de la misma.

c) Si la recarga es por filtración de canales, se sugiere utilizar el diagrama indicado en la figura 6, o algunos

de los procedimientos numéricos indicados en el texto, página 31.

d) Si la recarga es por filtración subsuperficial de áreas vecinas, deberá instalarse una red de pozos que permita el cálculo del gradiente hidráulico y la conductividad hidráulica del suelo, para ser usados en la ecuación de Darcy.

6. Para determinar la profundidad del nivel freático requerida por los cultivos en el punto medio entre los drenes, a pesar de ser muy general y no probada en nuestras condiciones, se recomienda el uso de la tabla 12.

No obstante lo indicado, se insiste en que ésta sugerencia tiene como único propósito uniformar criterios por cuanto la única forma de disponer de valores confiables es realizando investigaciones en el país.

7. Para el cálculo del espaciamiento entre drenes bajo condiciones de régimen permanente, se recomienda un valor de carga hidráulica de 0.2 a 0.3 metros.

8. No existen antecedentes suficientes que permitan especificar la tolerancia máxima que tienen los cultivos a condiciones de saturación. Por la misma razón, debiera

promoverse la investigación científica en este campo. Como una forma de lograr información preliminar al respecto se sugiere realizar una encuesta entre especialistas en cultivo, tanto de INIA como de las Universidades.

9. No obstante lo señalado en el punto 4.1 relativo a la recolección de datos de niveles freáticos, estimo que una exigencia realista mínima debiera ser de dos (2) lecturas, con un intervalo de 30 días, realizadas durante el período mas crítico de recarga (junio-julio si la recarga es por lluvia o durante el período de mayor frecuencia de riego).
10. A pesar de estar absolutamente comprobado que las ecuaciones para el cálculo del espaciamiento bajo condiciones de régimen permanente pueden utilizarse bajo condiciones de régimen impermanente y viceversa, se insiste en la recomendación indicada en la página 50, por cuanto unas y otras describen más fielmente las condiciones de flujo para las cuales fueron derivadas.
11. Las disposiciones de los drenes laterales o de campo debe ser tal que aseguren una máxima intercepción del flujo del agua subterránea. Esto se logrará eficientemente sólo en la medida que sean ubicados perpendicularmente a la dirección del flujo.

12. Definido el caudal máximo de descarga, según el procedimiento indicado en el punto 6.2, los diámetros y pendientes deberán determinarse según las ecuaciones de Darcy-Weisbach o Manning según se trate de tubos hidráulicamente lisos o corrugados, respectivamente.
13. Debe recomendarse el uso de material envolvente alrededor de una tubería de drenaje en toda circunstancia en que el suelo en que se hace la instalación sea estructuralmente inestable.

El mercado nacional ofrece una gran variedad de geotextiles que pueden utilizarse para este propósito. Existen también; sin embargo, otras alternativas locales que pueden aprovecharse tales como chancado de piedra, maicillos, arenas gruesas, etc. La decisión final deberá contemplar tanto aspectos hidráulicos como económicos imposibles de definir en un documento como éste.

CONCEPTOS GENERALES SOBRE DISEÑO
DE SISTEMA DE DRENAJE SUBSUPERFICIAL

ANEXO

1. ¿Qué profundidad del estrato impermeable estimar cuando no es posible determinarla ni tampoco existen antecedentes?

Puesto que no existan antecedentes, se supone que el consultor esta obligado a hacer una investigación de terreno para determinar la profundidad del estrato impermeable. Si los sondeos realizados indican que a una profundidad de 6 m aún no existe una estrata impermeable, se sugiere aceptar que el estrato se encuentra a esa profundidad, es decir, a 6 metros.

El efecto de esta estimación, ante la eventualidad que el estrato estuviere a una profundidad mayor, es que el espaciamiento calculado va a ser inferior al real o efectivo. Esto significa, en el pero de los casos, que el sistema quedaría sobredimensionado y, por lo tanto, debiera funcionar mas eficientemente.

2. ¿Cómo definir la cantidad de agua lluvia que el suelo es capaz de almacenar, cuándo la recarga es por este concepto?

Al momento que el suelo recibe la "lluvia crítica o de diseño" podemos razonablemente esperar que éste no se encuentra a Punto de Marchitez Permanente, aún cuando se trate del período de primavera-verano. En consecuencia, recomendaría que se considerara como almacenamiento el 50% de la humedad aprovechable calculada en una profundidad de suelo equivalente a la profundidad radicular de diseño.

3. ¿Es posible utilizar la fórmula de Hooghoudt en suelos homogéneos?

Si. Esto es absolutamente factible por cuanto la citada ecuación no es sino una forma particular de la ecuación del Servicio de Conservación de Suelos de U.S.A., donde se asume que los drenes se ubican justo en la interfase entre estratos del suelo. En términos numéricos :

$$\text{la ecuación : } E^2 = \frac{8 K_2 d \Delta h}{R} + \frac{4 K_1 \Delta h^2}{R} \text{ (Hooghoudt)}$$

al asumir $K_1 = K_2 = K$

se transforma en :

$$E^2 = \frac{8Kd \Delta h}{R} + \frac{4K \Delta h^2}{R}$$

donde :

- E = espaciamiento (m)
- K = conductividad hidráulica del suelo homogéneo (m/día)
- d = estrato equivalente (m)
- h = carga hidráulica (m)
- R = recarga o coeficiente de drenaje (m/día)

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Bouwer, H. 1978. Groundwater hydrology. McGraw-Hill Book Company.
- Comisión Nacional de Riego. 1991. Ley 18.450 de fomento al riego y drenaje. Secretaría Ejecutiva.
- FAO. 1985. Elementos para el proyecto de drenajes. Estudio FAO Riego y Drenaje N°38. Roma.
- Grassi, C. J. 1981. Manual de drenaje agrícola. CIDIAT, Serie Riego y Drenaje RD-10, Venezuela.
- Honorato, R. 1991. Edafología. Universidad de Chile, Santiago.
- Ochs, W.J. and B.G. Bishay. 1992. Drainage guidelines. World Bank Technical Paper Number 195. Washington.
- Oosterbaan, R.J. 1988. Drainage for agricultural. Twenty Seventh International Course on Land Drainage. (lectures notes).
- Salgado, L.G. 1971. Determinación de la conductividad hidráulica del suelo. Universidad de Concepción, Escuela de Agronomía, Chillán. Boletín Técnico N°6.
- Salgado, L.G. 1991. Habilidadación de suelos con drenaje restringido. Universidad de Concepción, Departamento de Ingeniería Agrícola, Chillán. Boletín de Extensión N°47.
- Salgado, L.G. 1994. Hydraulic performance of different combinations of drainage pipes and envelopes material under laboratory conditions. XII Congreso Mundial de Ingeniería Agrícola. Milán, Italia (en prensa).
- Tehmco, S.A. Tubería drenaflex. Catálogo Industrias Tehmco S.A. Santiago.

Universidad de Concepción. 1988. Estudio agroclimático y de riego de la Hoya del Itata. Departamento de Ingeniería Agrícola, Chillán.

Universidad de Concepción. 1991. Evaluación de la disponibilidad y utilización del agua para riego en la primera sección del río Maule. Departamento de Ingeniería Agrícola, Chillán.

Valenzuela, J. 1994. Especialista en horticultura. Universidad Adventista, Chillán (comunicación personal).