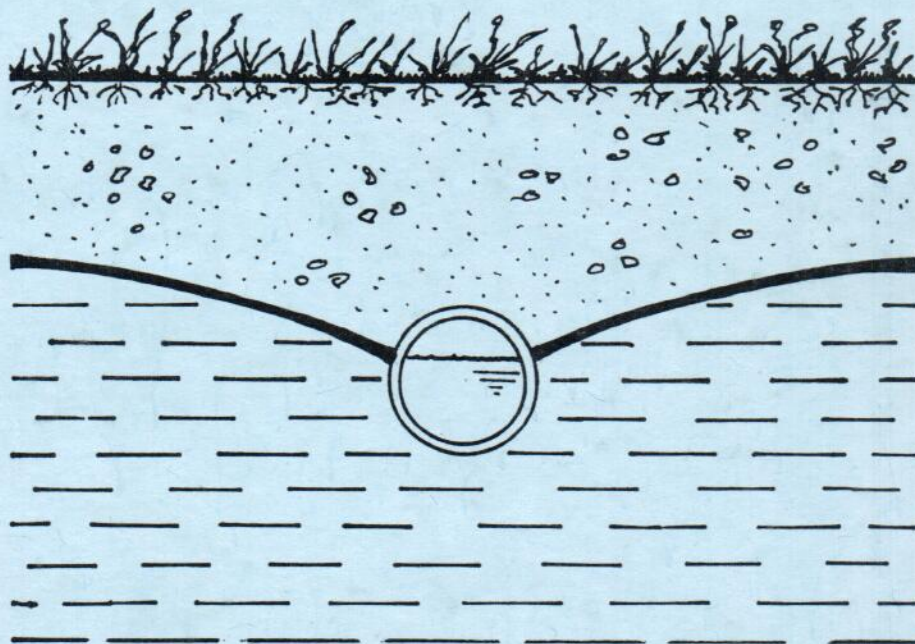




UNIVERSIDAD DE CONCEPCION
DIRECCION DE EXTENSION

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y FORESTALES

*HABILITACION DE
SUELOS CON DRENAJE
RESTRINGIDO*



Autor:
Luis Salgado S.
Ing. Agrónomo Ph.D.

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA AGRICOLA

Boletín de Extensión N° 47

Agosto 1991

Chillán

UNIVERSIDAD DE CONCEPCION
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS, VETERINARIAS Y FORESTALES
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA AGRICOLA

HABILITACION DE SUELOS CON DRENAJE RESTRINGIDO

Luis G. Salgado S.
Ing. Agrónomo, Ph.D.

Chillán, septiembre de 1991.

P R O L O G O

Estudios de suelos realizados entre Santiago y Osorno indican que Chile tiene una superficie del orden de las 800.000 hectáreas afectadas con problemas de drenaje restringido que fluctúan entre moderadamente bien drenados a muy pobremente drenados. Esta superficie representa el 38% del total arable existente entre ambas ciudades.

La mala distribución de las lluvias, preferentemente concentrada en los meses de invierno; las considerables pérdidas por filtración que ocurren en los canales, en su mayoría contruidos directamente en tierra y la mala eficiencia de los métodos de riego tradicionalmente utilizados en el país, hacen suponer que esta situación puede irse agravando día a día.

Si a lo anterior agregamos que cada día cuesta más incorporar nuevas superficies a una agricultura bajo riego, podemos concluir que es imperativo hacer un esfuerzo por recuperar estos suelos e incorporarlos a una agricultura intensiva. Ningún país puede darse el lujo de permitir que un 30% de su

superficie arable se encuentre limitada en su producción. El impacto en su economía es de una magnitud tal que puede representar un verdadero freno a su desarrollo.

Los conceptos y metodologías que se incluyen en este Boletín pretenden ser una ayuda a los profesionales que se desempeñan en el área y que continuamente están enfrentados a la solución de este tipo de problemas.

C O N T E N I D O

	Página
Generalidades	1
Investigaciones con fines de drenaje	3
1. Niveles de los estudios	4
2. Estudios específicos	7
Diseño de sistemas de drenaje	18
1. Espaciamiento entre drenes	18
2. Descarga máxima	24
3. Diámetros y pendientes	25
4. Disposición en terreno	27
Bibliografía	34

HABILITACION DE SUELOS CON DRENAJE RESTRINGIDO (1)

Dr. Luis G. Salgado (2)

GENERALIDADES

La producción de cultivos en condiciones económicamente rentables requiere de la existencia de un ambiente edáfico adecuado en la zona de exploración radicular. Dicho ambiente depende del régimen térmico e hídrico imperante, así como de su aireación y del nivel de salinidad y fertilidad.

En la naturaleza, el régimen de reposición natural de agua al suelo no siempre se ajusta a las necesidades de los cultivos. En consecuencia, es necesario recurrir al control de la humedad del suelo en forma tal de asegurar a éstos el ambiente adecuado para su crecimiento y desarrollo ya sea reponiendo agua mediante el riego o evacuando los excesos mediante un sistema de drenaje especialmente diseñado para tal efecto .

Por tanto, la habilitación de suelos con drenaje restringido tiene como objetivo eliminar el exceso de agua que se puede acumular, tanto en la superficie como en el interior del mismo, con el fin de mantener las condiciones óptimas de aireación y actividad biológica indispensables para cumplir los procesos fisiológicos relativos al crecimiento radicular.

(1) Trabajo presentado en las VII Jornadas de Suelos organizadas por la Sociedad Chilena de Ciencia del Suelo, 26 y 27 de octubre 1989, Santiago.

(2) Ingeniero Agrónomo, Ph.D., Profesor Asociado, Drenaje e Hidrología, Departamento Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción.

Asimismo, es objetivo del drenaje la remoción de las sales del suelo y la mantención de un balance salino. Por esto no sólo se entiende la lixiviación de sales que originalmente contiene el suelo y/o el agua de riego, sino también la disminución del nivel freático a profundidades tales que impidan que éstas alcancen hasta la superficie del suelo como producto del ascenso capilar.

En zonas "húmedas", donde la precipitación excede la evapotranspiración, es lógico esperar que se produzcan excesos de agua. Bajo tales condiciones y en presencia de una topografía desfavorable y baja capacidad de transmisión de agua de los estratos superiores del suelo, es posible que tales problemas sean aún más críticos. Si tales excesos se presentan durante el periodo vegetativo de los cultivos, resultan serias limitaciones al crecimiento, desarrollo y producción.

En zonas "áridas", donde la evapotranspiración excede la precipitación, no es frecuente que se presenten problemas de drenaje generados en forma natural. Sin embargo, puesto que en tales condiciones difícilmente es posible mantener una agricultura económicamente rentable, son los excesos de riego los que en estas circunstancias pueden crear un problema de drenaje. Estos efectos se ven considerablemente influenciados por los métodos de riego utilizados. Si la eficiencia de aplicación del agua de riego disminuye, las pérdidas por percolación aumentan y como consecuencia de esto es posible esperar una elevación de la napa freática del suelo a niveles que pueden limitar el desarrollo radicular.

En las páginas siguientes se hace una breve revisión de las técnicas más usuales para habilitar suelos con problemas de drenaje restringido. Por razones de espacio y además por estimar que éstas son las de mayor interés, las técnicas a que se hace referencia son aquellas relativas a la habilitación de suelos que tienen problemas de drenaje subsuperficial, es decir, aquellos en los cuales el problema se produce por un exceso de agua en el perfil del suelo manifestado por la presencia de una napa freática, permanente o fluctuante, a una profundidad tal que restringe el desarrollo radicular.

Previo al estudio de tales técnicas, sin embargo, se hace una revisión de las diferentes investigaciones de terreno que es

necesario conducir con anterioridad al diseño de un sistema de drenaje.

INVESTIGACIONES CON FINES DE DRENAJE

El objetivo fundamental de los estudios e investigaciones de terreno con fines de drenaje, radica en la necesidad de estudiar exhaustivamente el área problema, como única forma de disponer de suficientes elementos de juicio para proceder a un diagnóstico realístico del mismo. Usualmente estos estudios se realizan en lugares donde ya existen problemas de drenaje y/o salinidad, pero en otros casos tienen como objetivo efectuar un pronóstico acerca de cuál podría ser la situación futura como consecuencia de, por ejemplo, la puesta en riego o la construcción de un gran canal.

Este segundo caso se presenta frecuentemente en los nuevos proyectos de riego donde, los nuevos volúmenes de agua incorporados al sistema, imprimen una sustancial modificación al balance hídrico en equilibrio con el clima, creando, por lo tanto, un aumento de los niveles freáticos como consecuencia del aumento de la recarga. En muchos nuevos proyectos es común observar la aparición de problemas de drenaje en lapsos tan breves como 5 a 10 años después de la iniciación del riego.

Una baja capacidad natural de drenaje que puede tender a crear problemas de exceso de humedad en un futuro, es posible reconocerse si se dispone de suficiente información geológica, edáfica, hidrológica y climática. Ello permite adoptar medidas en cuanto a disminución de la recarga y/o aumento de la capacidad de descarga; y en cuanto a estudios e investigaciones previas, tendientes a un mejor conocimiento de la transmisibilidad de los estratos.

Según los estándares del Bureau of Reclamation (USA), en cualquier investigación de drenaje, lo que se busca son los datos necesarios para responder a las siguientes interrogantes:

- a. ¿Existen en la actualidad o se producirá en el futuro un exceso de agua?
- b. ¿Existe una salida adecuada para eliminar el exceso de agua?

- c. ¿Cuál es la fuente de exceso de agua?
- d. ¿Los suelos pueden ser adecuadamente drenados?
- e. ¿Cuánta agua debe ser removida?
- f. ¿Cuál sistema de drenaje dará los mejores resultados?

Aun cuando aspectos agrícolas, económicos, sociales, legales e institucionales son de indudable relevancia para comprender y resolver integralmente un problema de drenaje, los factores físicos de mayor importancia son: topográficos, suelos, geológicos, salinidad, niveles freáticos y piezométricos y conductividad hidráulica. Estos últimos aspectos se discuten brevemente en la sección siguiente.

1. NIVELES DE LOS ESTUDIOS

Puesto que cada proyecto tiene objetivos específicos muy claros y precisos, no todos los estudios de terreno es necesario realizarlos a un mismo nivel de profundidad o detalle. Más aun, es recomendable que tal estudio se realice en etapas con el propósito de no malgastar tiempo ni recursos económicos en proyectos que no son técnica y/o económicamente factibles. Los niveles usualmente reconocidos son:

1.1 Reconocimiento.

El objetivo principal de esta fase es identificar si el proyecto propuesto es factible, tanto desde un punto de vista técnico, como económico. Este estudio debe dar una respuesta a las siguientes interrogantes:

¿Qué área debe ser considerada para el mejoramiento?

¿Qué ventajas y desventajas pueden producirse o esperarse por los cambios que se van a introducir?

¿Cuáles son las alternativas posibles?

¿Qué medidas técnicas deben considerarse en las alternativas propuestas?

¿Cuál será, aproximadamente, la relación costo-beneficios?

A este nivel, el estudio debe basarse fundamentalmente en la información existente con inclusión de un limitado trabajo de terreno. Algunos datos importantes son: fotografía aérea, toda clase de mapas (geológicos, topográficos, uso actual, caminos, etc.), datos de suelos, agua, clima, rendimientos, etc.

Los mapas deben considerar toda la hoya hidrográfica en la cual se encuentra localizado el proyecto en consideración, el cual debe delimitarse específicamente a objeto de conocer aspectos tales como: superficie total, tipo de suelo, evacuación del agua, reutilización del agua, efecto sobre áreas adyacentes, etc.

Si no hay datos suficientes para formarse un juicio realista de la situación imperante, debe elaborarse de inmediato una estrategia tendiente a su recolección. Eventualmente dicho plan puede contemplar el establecimiento de un campo experimental y un área piloto.

1.2 Semidetallado.

La diferencia fundamental entre esta etapa y la anterior es que se necesita un mayor detalle. Para tal efecto, deben realizarse estudios de terreno.

Los datos obtenidos deben tener suficiente detalle para permitir el diseño de las alternativas propuestas, cuyo costo debe calcularse con un 10% de aproximación. Costos y beneficios son determinados y comparados con los precios locales del área.

Los mapas de suelos y topográficos deben ser a escalas 1:25000, o preferiblemente 1:10000, con curvas de nivel a 25 cm.

Este estudio semidetallado se conoce también como estudio de factibilidad, puesto que en base a él, las autoridades respectivas seleccionarán un plan y decidirán su ejecución.

1.3 Detallado

Implica el cálculo, diseño y trazado definitivo de todo aquello que debe construirse. Como por ejemplo drenes, caminos, estructuras, estaciones de bombeo, etc. Los gastos de construcción calculados en esta etapa no deben diferir grandemente de la estimación hecha en la fase previa.

Los mapas se requieren en escalas 1:10000 ó 1:25000. En caso de estructuras se requieren escalas aun mayores (1:100, 1:50). El paso final es la definición de las especificaciones técnicas propias de las diferentes partes del proyecto.

El método de trabajo comprende: 1) revisión de los datos disponibles y 2) reconocimiento de campo. La revisión de los datos disponibles, consiste en coleccionar y analizar toda la información de distintas fuentes: topografía, suelo, geología, hidrología, clima, cultivos, etc. directa o indirectamente relacionada con el problema de drenaje; pero que constituye una información valiosa para reconocer en forma global el problema y decidir la colección de datos adicionales. El reconocimiento de campo, en cambio, provee la observación visual del problema y ayuda a planear la secuencia de estudios e investigaciones. Los estándares del Bureau of Reclamation enumeran los siguientes puntos a ser aclarados en el reconocimiento de campo:

- a. Ubicación y capacidad de los drenajes naturales.
- b. Ubicación y condición de las salidas.
- c. Ubicación y características de las fuentes de agua: canales, pozos, lagunas, embalses, etc.
- d. Prácticas de riego empleadas. Métodos de aplicación, eficiencia de riego, sistematización de los terrenos, etc.

- e. Estimación del nivel del agua subterránea e información relacionada con las fluctuaciones y dirección del flujo.
- f. Patrón de cultivos en el presente y tendencia futura.
- g. Tipo, ubicación, espaciamiento, profundidad y efectividad de drenes en el área o en áreas vecinas.
- h. Marcas de altura de crecidas que pueden ser usadas para evaluar el daño que causaron y/o pueden causar en el futuro.
- i. Accidentes topográficos que podrían afectar la localización de los drenes.

2. ESTUDIOS ESPECIFICOS

2.1 Estudios topográficos.

Los planos topográficos deben proveer una real representación de la configuración superficial del terreno, incluyendo los accidentes naturales y/o artificiales de importancia ya sea porque impiden o facilitan el drenaje natural.

La escala del mapa debe ser función del nivel del estudio, del área involucrada y de las pendientes y accidentes topográficos relevantes. Para grandes áreas y estudios preliminares, puede ser suficiente una escala 1:50.000. Para áreas menores y estudios de un grado mayor de detalle, escala 1:25.000. Estudios especiales pueden requerir escala 1:5.000.

En estudios preliminares las curvas de nivel deben ubicarse a 1.0 m de equidistancia vertical. Para el trazado de los sistemas de drenaje se requiere, a lo menos, 0.5 m. En terrenos muy planos 0.25-0.20 m.

El plano debe incluir ubicación de las principales estructuras hidráulicas (embalses, red de canales, etc.)

así como perfiles longitudinales de los cauces naturales (ríos, arroyos), de los posibles colectores y de la red general de riego.

En nuestro país, el reglamento actual que rige las disposiciones establecidas en la Ley 18.450 sobre Normas para el Fomento de la Inversión Privada en Obras Menores de Riego y Drenaje, en su Artículo 5, letra a, señala que los proyectos de drenaje deberán contener "indicación del área que presenta problemas de drenaje, la cual se deberá delimitar en un plano topográfico con curvas de nivel a equidistancias adecuadas a su extensión y características".

Con anterioridad al 19 de octubre de 1988, fecha en que se introdujeron importantes modificaciones al citado reglamento, se señalaba que los estudios topográficos, debían presentarse a escala 1:10.000.

2.2 Estudios de suelos.

Los mapas convencionales de suelos no siempre incluyen la información requerida con fines de drenaje. De ser necesario, deben conducirse estudios especiales los cuales deben presentarse en una escala acorde con el nivel del estudio.

Al respecto, el mismo Reglamento ya citado, en su artículo 5 letra e, señala que los Proyectos que se postulan a los beneficios de la Ley 18.450 deben incluir: "estudio agrológico detallado a escala 1:10.000 que incluirá la definición de series y fases reales de suelo con las clasificaciones interpretativas de clases, subclases y unidades de capacidad de uso actuales y potenciales, clases de drenaje, categorías de riego, grupos de manejo de cada una de las unidades cartográficas y determinación de la conductividad hidráulica, salinidad, constantes hídricas, densidad aparente y textura. Las fases de suelo se deberán separar hasta superficies mínimas de 0.5 ha".

En general, la descripción del perfil del suelo con sus características de color, textura, estructura, etc. da una idea acerca del drenaje natural del suelo. Algunos índices al respecto son:

- color gris y presencia de moteados.
- presencia excesiva de materia orgánica (climas húmedos).
- aumento de la salinidad hacia la superficie.

Mapas convencionales de suelos no entregan información a profundidades mayores de 1.20 m - 1.50 m. En drenaje se requiere información hasta 4-5 m y aun más, hasta llegar al estrato impermeable. De esta forma, es posible identificar el tipo de flujo predominante hacia el dren.

De particular importancia es la confección de perfiles que indiquen la profundidad a que se encuentra el estrato impermeable. Puesto que éste define el límite inferior de la región de flujo del agua hacia los drenes, es un parámetro de vital importancia en el cálculo del espaciamiento entre drenes.

2.3 Estudios geológicos.

La geología y la geomorfología del suelo representan una valiosa ayuda para identificar problemas de drenaje. La acción que ha dado origen al material del suelo (glacial, eólico, aluvial) tienen relación directa con su textura y permeabilidad. Generalmente los mayores problemas de drenaje se encuentran en suelos de origen aluvial.

Cuando existen situaciones de aguas artesianas que abastecen los estratos superiores del suelo, deben hacerse estudios de comportamientos de pozos, oportunidad en que se aprovecha de estudiar las condiciones geológicas a mayor profundidad.

En consecuencia, los mapas geológicos y las descripciones del perfil geológico constituyen información que, si bien no es indispensable en los estudios de drenaje, complementan los datos necesarios para identificar y caracterizar el problema.

2.4 Uso actual de la tierra.

Comprende el inventario de la tierra desde un punto de vista de su utilización actual y potencial y su ubicación en el mapa.

La delimitación por uso de la tierra puede hacerse a través de interpretación de fotografía aérea, contribuyendo a reconocer el problema de drenaje y relacionarlo con las posibles fuentes de recarga. Terrenos intensamente cultivados y regados son fuentes de recarga. Terrenos con vegetación natural generalmente son áreas de descarga.

2.5 Salinidad.

Como ya se mencionó en párrafos anteriores, la salinidad del suelo es un factor determinante en el diseño de una red de drenaje por cuanto la presencia de sales solubles significa que deben considerarse ciertos "requerimientos de lavado" y en consecuencia, ello significará un sobredimensionamiento de la red.

La delimitación de las áreas que tienen diferentes grados de salinidad y/o alcalinidad, permiten programar la recuperación de los suelos mediante el drenaje. Los procedimientos que se deben seguir son dependientes del tipo de suelo:

- En suelos salinos, la recuperación del suelo se basa en la lixiviación de sales mediante lavado.
- En suelos sódicos, el primer paso consiste en reemplazar o movilizar el sodio mediante calcio o azufre. Posteriormente, se procede al lavado.

En zonas àridas es especialmente importante disponer de "mapas complementarios de recuperaci3n de suelos salinos" (en base a la conductividad elèctrica y lÀmina de lixiviaci3n) y "mapas de recuperaci3n de suelos s3dicos" que contengan los requerimientos de yeso y de lavado. Esto constituye un valioso auxiliar para diagnosticar el problema de drenaje.

2.6 Conductividad hidràulica.

La conductividad hidràulica del suelo representa la habilidad que tiene èste para conducir agua bajo condiciones de saturaci3n. Depende tanto de las características propias del fluido (agua) como las del medio poroso (suelo). Las mas importantes son: temperatura del agua, textura y estructura del suelo, interacci3n entre el agua y el suelo, bloqueo de poros, microorganismos, grietas y raices. AdemÀs de lo anterior varía tambièn con el tiempo puesto que todos los factores mencionados son dinàmicos.

La conductividad hidràulica es un parÀmetro que influye directamente sobre el espaciamiento a que deben ubicarse los drenes. Si la conductividad aumenta los drenes podràn ubicarse a mayor distancia unos de otros y viceversa. Por èsta raz3n su determinaci3n es de fundamental importancia. De acuerdo a las bases tècnicas vigentes para presentar proyectos a concursos de la ley 18450, la conductividad hidràulica del terreno se debe determinar mediante mètodos directos ya sea de terreno o laboratorio.

En atenci3n a la diversidad de factores que inciden en los valores de la conductividad hidràulica propia de un suelo, es altamente recomendable que: los mètodos de determinaci3n sean preferentemente de terreno, se hagan tantas determinaciones como sea necesario y, finalmente, se confeccionen planos separando suelos con distintas categorías de conductividad. Ello permitirÀ un cÀlculo y una distribuci3n mÀs racional del espaciamiento entre drenes.

2.7 Recarga.

La recarga o exceso de agua que crea el problema de drenaje puede tener varios orígenes: lluvia, riego, filtraciones, inundaciones, etc. Estas causas pueden presentarse individualmente o como una combinación de dos o más de ellas.

El objetivo de este estudio consiste en cuantificar en forma exacta la cantidad de agua que es necesario evacuar con el objeto de diseñar y dimensionar el sistema de drenaje.

En nuestro país, las bases técnicas de los llamados a concurso para acogerse a los beneficios de la ley 18450, establecen que es posible distinguir los siguientes casos en la determinación de las fuentes de recarga.

- 2.7.1 Si la recarga proviene directamente de aguas lluvias se deberán efectuar los estudios necesarios para determinar la precipitación máxima que ocurriría anualmente en periodos variables de 1 día, 2 días y hasta 3 días consecutivos. Este análisis se deberá realizar considerando un periodo de retorno que no podrá ser inferior a 5 años.

El profesional responsable del estudio deberá justificar la selección de la estadística base que considere representativa del régimen de precipitaciones máximas del área del proyecto.

- 2.7.2 Si la recarga tiene su origen en el riego que se aplica directamente en el área afectada, se deberá determinar la percolación proveniente del volumen de agua aplicada y su frecuencia, los que a su vez dependen del tipo de cultivo y del método de riego utilizado. Si existieren problemas de salinidad se deberá considerar los requerimientos de lavado y determinar la fracción que percola.

2.7.3 Si la recarga proviene de aguas externas al área de mal drenaje tales como: pérdidas por filtración en cauces naturales y canales que cruzan el área afectada, percolación de regadíos ubicados en zonas o áreas más elevadas topográficamente; flujos subterráneos provenientes de zonas vecinas situadas a una cota igual o superior; existencia de agua artesiana en el subsuelo y exceso de aguas superficiales e infiltración provenientes de lagos, embalses y cauces naturales y canales situados fuera del área afectada; el profesional responsable del estudio deberá desarrollar una metodología que le permita identificar con precisión el origen de la recarga y cuantificar sus aportes sobre la base de los antecedentes de que disponga y de los estudios específicos que realice.

De lo indicado en los párrafos precedentes queda claro que el profesional responsable del proyecto tiene plena libertad para utilizar la metodología de análisis de la información que estime pertinentes, en tanto pueda justificar la validez de ésta. A modo de ejemplo a continuación se incluye algunos datos factibles de ser utilizados en la provincia de Ñuble, para el análisis de los excesos de lluvia, riego y filtraciones de canales, obtenidos por investigaciones del Depto. de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Concepción.

Tabla 1. Altura - frecuencia - duraci3n de lluvias en Chill3n, segun m3todo de probabilidades extremas de Gumbel (1).

Mes	Probab. %	Periodo retorno (años)	Lluvia m3x.en x-dias (mm)		
			1	2	3
Enero	20	5	20.59	21.7	22.5
	14	7	24.3	25.6	26.5
	10	10	28.1	29.6	30.6
Marzo	20	5	23.0	25.3	25.3
	14	7	27.2	30.0	30.0
	10	10	31.5	34.8	34.8
Mayo	20	5	75.6	98.9	112.5
	14	7	85.6	111.5	126.2
	10	10	95.8	124.4	140.3
Julio	20	5	64.8	91.5	110.6
	14	7	72.3	102.2	124.2
	10	10	80.1	113.3	138.1
Sept.	20	5	41.0	60.5	69.2
	14	7	46.1	68.7	78.7
	10	10	51.4	77.1	88.6
Nov.	20	5	33.2	42.3	49.3
	14	7	38.3	49.5	57.8
	10	10	43.5	56.9	66.5

(1) Datos diarios de 21 años, Estaci3n Agrometeorol3gica FACAF. Chill3n.

Tabla 2. Ecuaciones propuestas para el cálculo de la pérdida (P en %) de agua por unidad de largo del canal (1).

Ecuaciones	
$P = \frac{Q_0 - Q_f}{Q_0} * \frac{1}{L}$	$Q_0 = \text{Caudal inicial (m}^3/\text{s)}$
$P = \frac{1}{L} \ln \frac{Q_f}{Q_0}$	$Q_f = \text{caudal final (m}^3/\text{s)}$
$P = 1 - \sqrt{\frac{Q_f}{Q_0}}$	$L = \text{largo (m)}$

(1) Jara, J.; E. Villarroel y Valenzuela, H. 1988. Anàlisis matemàtico de la eficiencia de conducciòn en canales AGROCIENCIA 4 (2): 153-157.

Tabla 3. Eficiencia de aplicaciòn en cultivos escardados y praderas artificiales en el Departamento de Chillàn (1).

Cultivo	Pèrdidas (%)		Eficiencia Aplicaciòn Superficial
	Percolaciòn Profunda	Escurrimiento Superficial	
Praderas	18.3	62.2	19.5
Escardados	23.0	49.3	27.7
Promedio	21.1	55.6	23.3

(1) Valenzuela, A. y L. Peña. 1966. Eficiencia de utilizaciòn del agua de riego en el Departamento de Chillàn. Escuela de Agronomìa, Estaciòn Experimental, Boletín Tècnico N°5.

2.8 Niveles freáticos.

Un estudio de esta naturaleza implica el análisis de la hidrodinámica del agua subterránea dentro de los límites de la región de flujo. Es decir, el estudio debe abarcar desde la superficie del suelo hasta el estrato impermeable.

Como podrá comprenderse, éste es uno de los mas importantes estudios de terreno por cuanto entrega información relativa a:

- 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 cómo el sistema puede ser alterado artificialmente de modo que el nivel freático resultante no cause daño a los cultivos.

Usualmente un estudio de este tipo comprende los siguientes pasos:

2.8.1 Recolección de datos.

Esta etapa consiste en la construcción de una red de pozos de observación o piezómetros destinados a la recolección de la información de profundidad del nivel freático o de los niveles piezométricos.

La forma como se tomen los datos, y la frecuencia con que éstos se realicen, serán función del tipo y magnitud del estudio que se conduzca. Cuidado especial deberá tenerse en obtener la información que es particularmente relevante al problema en aspectos tales como filtraciones provenientes de ríos, canales y embalses.

2.8.2 Procesamiento de datos.

El procesamiento de datos de niveles freáticos consiste en la confección de registros o formularios especiales, confección de histogramas y confección de mapas y perfiles. Todos ellos contribuirán a una adecuada evaluación del problema.

Un histograma es un gráfico que muestra la elevación del nivel freático con respecto al tiempo. Entrega información acerca de: velocidad de ascenso o descenso del N.F., periodo del año en que la altura del N.F. es crítica, causas que provocan las fluctuaciones, áreas que tienen problemas similares, etc.

Los mapas y perfiles más importantes que es posible confeccionar con la información recolectada son :

- a. Mapa de isoprofundidad
- b. Mapa de fluctuaciones del nivel freático
- c. Mapa de isohipsas
- d. Mapas de diferencia de carga hidráulica
- e. Perfiles del nivel freático
- f. Perfiles piezométricos.

2.8.3 Evaluación de datos.

La fase de evaluación consiste en el análisis crítico de cada uno de los histogramas, mapas y perfiles elaborados con el objeto de definir las estrategias que se utilizarán en el diseño de la red en drenaje.

De esta evaluación es posible obtener, entre otras, información relativa a: velocidad de ascenso o descenso del nivel freático, periodos críticos, áreas de recarga y descarga, dirección del flujo subterráneo, áreas con mayor o menor problema, resistencia radial al flujo, cambios en el almacenamiento de agua, etc.

En relación a los mapas de isolíneas o isoprofundidad del nivel freático, las bases técnicas para optar a concursos de la ley 18450 establecen que:

"Se ejecutarán los trabajos de terreno necesarios para medir los niveles freáticos existentes en el área afectada. La cantidad y distribución de las prospecciones dependerá de las características topográficas y edafológicas del terreno y la ubicación de cada una de ellas deberá quedar referida a los sistemas de coordenadas y de cotas utilizadas en el plano topográfico. La representación de las prospecciones ejecutadas y de sus respectivos niveles freáticos en el plano topográfico permitirá el trazado de las isolíneas del nivel freático. La equidistancia de las isolíneas dependerá del rango de variación de los niveles freáticos, pero no podrá ser superior a 0.5 m."

DISEÑO DE SISTEMAS DE DRENAJE

Terminada la etapa anterior, de recolección, procesamiento y evaluación de la información obtenida en terreno, estamos en condiciones de iniciar la etapa de diseño del sistema de drenaje. Esta etapa comprende a su vez las siguientes fases: cálculo del espaciamiento, determinación de la descarga máxima, cálculo de diámetros y pendientes y disposición en el terreno.

1. Espaciamiento entre drenes

En un sistema de drenes paralelos, el espaciamiento es la distancia que media entre dos líneas. Existen numerosas ecuaciones que permiten determinar el espaciamiento. En los párrafos siguientes se mencionarán sólo dos de ellas.

El análisis teórico del cálculo del espaciamiento parte de la consideración de que en el suelo pueden existir condiciones de régimen permanente e impermanente para el movimiento del agua.

1.1 Régimen permanente

En este caso se supone que existe un equilibrio entre la cantidad de agua que cae o llega al suelo (recarga) y la que es evacuada por los drenes (descarga). En tales condiciones, la profundidad del nivel freático a lo largo del tiempo y en cualquier punto del terreno, permanece constante.

Esta condición es factible de encontrarse en una zona en la cual, por ejemplo, estuviese lloviendo permanentemente, con una intensidad constante y recargando la zona saturada. No obstante la dificultad para que esta condición se logre en la naturaleza en la forma que se ha sido descrita, el método ha sido frecuentemente utilizado por los buenos resultados que entrega.

Una de las ecuaciones más conocidas y más utilizadas de este tipo es aquella determinada por Hooghoudt (ver Figura 1). Dicha fórmula modificada establece que:

$$L^2 = \frac{8 K_2 d \Delta h}{R} + \frac{4 K_1 \Delta h^2}{R} \quad (1)$$

Donde:

- L = espaciamiento entre drenes (m)
- K_1 = conductividad hidráulica del estrato de suelo ubicado sobre la base de los drenes (m/día)
- K_2 = conductividad hidráulica del estrato de suelo ubicado bajo la base de los drenes (m/día)
- d = estrato equivalente (m)
- Δh = carga hidráulica (m)
- R = recarga (m/día)

Esta ecuación tiene la ventaja de poder ser utilizada cuando el suelo consta de dos estratas y la base de los drenes coincide exactamente con el límite entre ambas. Si el suelo es homogéneo ($K_1 = K_2$), los drenes se ubican a cualquier profundidad y la ecuación puede igualmente ser utilizada.

El "estrato equivalente" (d), representa la región de flujo bajo los drenes, por donde se desplaza la mayor cantidad de agua. Su valor es función del radio de los drenes (r_0), o del perímetro mojado si se trata de zanjas abiertas, de la profundidad al estrato impermeable (D) y del espaciamiento (L). Para su cálculo existen varios procedimientos. Uno de estos se incluye en la Tabla 4, a partir de la cual es posible obtener el valor de " d ", luego de calcular las variables auxiliares Δ , λ y δ , las cuales a su vez son función de L , r_0 y D .

Puesto que el espaciamiento (L) depende del estrato equivalente (d) y este último a su vez lo es del espaciamiento, la ecuación de Hooghoudt no puede solucionarse en forma directa, sino a través de una serie de iteraciones sucesivas hasta que un valor estimado del espaciamiento, a través del cual es posible obtener " d ", sea igual al valor calculado mediante la ecuación.

Boumans ha propuesto el uso de la figura 2 para solucionar en forma directa la ecuación 1. Para tal efecto, se requiere calcular previamente los puntos "b", "c" y "d", indicados en el gráfico. El procedimiento consiste en encontrar el punto "e" mediante unión de "b" con "c" y luego el punto "a" mediante unión de "d" con "e". El valor final de espaciamiento se obtiene mediante la ecuación indicada en el recuadro del mismo gráfico.

1.2 Régimen impermanente

En áreas con riegos periódicos o lluvias de alta intensidad, la teoría del régimen permanente no es válida, y para el cálculo del espaciamiento es necesario recurrir a ecuaciones basada en el principio del régimen impermanente o variable.

λ	10	20	30	40	50	60	80	100	150	200	250	300	400	500	600	800	1000	1500	2000	2500	3000	4000	5000	6000	8000	10000	λ
3	3.00																										3
4	3.40	3.86	3.92	3.96	3.98	3.99	4.00																				4
5	4.20	4.46	4.60	4.69	4.75	4.82	4.85	4.90	4.92	4.94	4.95	4.96	4.97	4.98	5.00												5
6	4.25	4.83	5.10	5.27	5.40	5.54	5.63	5.76	5.82	5.86	5.88	5.91	5.93	5.94	5.96	5.97	5.99	6.00									6
7		5.05	5.47	5.74	5.93	6.18	6.34	6.55	6.66	6.73	6.77	6.82	6.86	6.89	6.92	6.94	6.97	6.98	6.99	7.00							7
8		5.21	5.77	6.13	6.38	6.74	6.98	7.30	7.48	7.57	7.64	7.72	7.78	7.82	7.86	7.89	7.92	7.95	7.97	7.98	8.00						8
9		5.22	5.96	6.41	6.74	7.20	7.54	7.97	8.23	8.37	8.47	8.60	8.68	8.73	8.78	8.83	8.88	8.92	8.94	8.96	8.98	9.00					9
10		6.12	6.66	7.06	7.64	8.04	8.63	8.94	9.14	9.27	9.44	9.56	9.63	9.72	9.77	9.83	9.87	9.90	9.92	9.96	9.98	10.0					10
15		6.18	7.10	7.92	9.10	9.87	11.1	11.9	12.5	12.8	13.3	13.7	13.9	14.1	14.3	14.5	14.6	14.7	14.8	14.9	15.0						15
20		8.00	9.64	10.8	12.8	14.1	15.0	15.7	16.6	17.2	17.6	18.2	18.5	19.0	19.2	19.4	19.5	19.6	19.7	19.8	19.9	20.0					20
25		9.72	11.3	13.9	15.6	16.9	17.9	19.3	20.2	21.0	21.8	22.4	23.1	23.6	23.8	24.0	24.2	24.4	24.6	24.8	24.9						25
30		11.4	14.6	16.7	18.4	19.7	21.6	22.8	23.8	25.1	26.0	27.2	27.9	28.3	28.5	28.9	29.1	29.3	29.6	29.8							30
35		14.9	17.5	19.5	21.1	23.4	25.2	26.4	28.2	29.3	31.0	31.9	32.5	32.8	33.4	33.7	34.0	34.3	34.5								35
40		15.3	18.8	21.4	23.9	27.4	30.2	32.4	35.6	37.8	41.2	43.1	44.3	45.2	46.4	47.0	47.5	48.0	48.2								40
50		18.9	22.1	24.9	29.2	32.6	35.4	39.4	42.3	47.0	49.7	51.5	52.7	54.4	55.4	56.1	56.9	57.2									50
60		22.3	25.5	30.4	34.4	37.6	42.4	46.2	54.2	55.7	58.1	59.8	62.0	63.6	64.6	65.7	66.2										60
70		22.4	25.8	31.2	35.6	39.4	45.2	49.6	56.8	61.3	64.3	66.5	69.4	71.4	72.6	74.2	75.0										70
80		25.9	31.8	36.6	40.8	47.5	52.3	60.9	66.3	70.0	72.7	76.3	78.9	80.5	82.6	83.8											80
90		32.2	37.2	41.8	49.2	54.8	64.5	70.9	75.3	78.5	83.0	86.0	88.0	90.8	92.3												90
100		32.4	38.7	44.6	55.0	62.5	77.5	88.4	96.4	103	112	118	122	128	132												100
150		38.8	44.8	56.4	66.5	85.5	99.7	111	120	133	143	150	160	167													150
200		56.7	67.9	90.0	107	121	133	150	164	174	188	198															200
250		56.8	68.1	92.7	113	129	142	164	180	193	212	226															250
300		68.2	94.4	116	132	150	175	194	210	234	253																300
400		95.2	118	138	155	183	206	224	246	262	282	309															400
500		95.5	121	143	163	196	224	246	262	282	305	340															500
600		147	170	210	245	274	323	364	400	440	477																600
700		172	214	251	284	338	384	413	457	500																	700
800		217	256	291	349	400	457	500																			800
1000		218	260	296	358	413	457	500																			1000
1500		220	267	308	384	457	500																				1500
2000		312	396	477	500																						2000
2500		400	484																								2500

$$\Delta = \frac{D}{r_0}, \lambda = \frac{L}{r_0}, d = \delta r_0$$

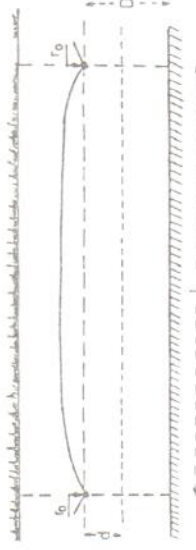


Tabla 4. Valores de "δ" para determinar el estrato equivalente (d) de Hooghoudt.

Este principio asume que, estando la napa freática a una cierta profundidad (ver figura 3), se produce una recarga del acuífero, bien sea por lluvia, pérdidas por percolación en el riego, o cualquier otra causa, de forma que si el sistema de drenaje no tiene la capacidad de evacuación correspondiente, asciende el nivel hacia la superficie. Posteriormente, por cese de la causa que produjo la recarga y como consecuencia del aumento de la carga hidráulica, vuelve a descender hasta un nivel similar al de su origen. Este proceso se repite a lo largo del año, tantas veces como suceda una recarga.

Para la solución de este caso, los datos requeridos son diferentes a aquellos utilizados para condiciones de régimen permanente. En lugar del coeficiente de drenaje o recarga (R), se necesita conocer el intervalo de tiempo necesario para bajar el nivel freático desde una posición H (altura inicial del nivel freático) a otra H (altura del nivel freático al tiempo "t"), en un estrato que tiene una "porosidad drenable" o "rendimiento específico" (\emptyset) conocido. Asimismo, se requiere conocer la conductividad hidráulica de dicho estrato (K) y el espesor del estrato transmisor de agua hacia el dren (D).

Una de las ecuaciones más conocidas y de mayor uso para el cálculo del espaciamiento en suelos homogéneos, con drenes que llegan hasta el estrato impermeable y sometidos a una condición de flujo impermanente o variable, es la siguiente:

$$L^2 = \frac{\pi K D t}{\emptyset \ln (1.16 H/H_t)} \quad (2)$$

Donde:

L = espaciamiento entre drenes (m)

K = conductividad hidráulica del estrato transmisor de agua (m/día)

D = espesor del estrato transmisor (m)

t = tiempo requerido para que el nivel freático descienda desde H a H_t.

H_t = altura del nivel freático al tiempo "t" (m).

∅ = porosidad drenable o rendimiento específico del suelo (%).

La "porosidad drenable" o "rendimiento específico" representa el volumen de agua drenado desde una unidad de volumen de suelo saturado, por efecto de la disminución de la napa freática. Como tal, es función de la conductividad hidráulica y puede obtenerse a partir de la figura 4.

Si los drenes no llegan hasta el estrato impermeable, es necesario introducir una modificación a la ecuación anterior, cambiando el valor de "D" por el del "estrato equivalente" de Hooghoudt (d) (Tabla 4). Al utilizar tal ecuación modificada, se toma en consideración la convergencia que sufren las líneas de flujo (flujo radial), en la cercanía de los drenes. La forma general de esta ecuación será en consecuencia:

$$L^2 = \frac{\pi K d t}{\emptyset \ln (1.16 H/H_t)} \quad (3)$$

Al igual que en la solución de la ecuación de Hooghoudt (Ec. 1), la ecuación 3 no se puede resolver en forma directa. Para obviar esta situación, el Bureau of Reclamation de U.S.A. propone la solución de la ecuación 2 por medio de las figuras 5 y 6, que corresponden a situaciones en las cuales los drenes se encuentran sobre y en el estrato impermeable, respectivamente.

En el caso particular en que los drenes no llegan hasta el estrato impermeable (fig. 5), es necesario calcular previamente el espesor promedio del estrato transmisor de agua (D_o). Para tal efecto se usa la siguiente relación:

$$D_0 = D + \frac{H}{2} \quad (4)$$

El uso de las figuras 5 y 6 implica previamente el cálculo de la relación H/H_t . Con este valor se entra al gráfico y luego se calcula el espaciamiento a partir de la cifra leída en la abscisa del gráfico.

Finalmente, es necesario mencionar que la aplicación práctica de esta ecuación puede hacerse en base a dos criterios: para condición de máxima demanda y para condición de equilibrio dinámico.

Para el primer caso, se utiliza la recarga instantánea (R_i), ocurrida durante el período de máxima demanda de riego (peak). Bajo tales condiciones, la altura alcanzada por la napa freática será máxima y puesto que no existirán recargas mayores que ésta, nunca se sobrepasará tal altura, respetando la profundidad de raíces seleccionada.

En el segundo caso, debido a que el intervalo de riegos es cada vez menor, se asume que la napa freática sube gradualmente durante la temporada hasta alcanzar el máximo durante la época de máxima demanda. Con posterioridad a esta fecha, la altura de la napa vuelve a disminuir. Puesto que en este caso H , y H_t , no se conocen de antemano y además cambian con el tiempo, el cálculo del espaciamiento requiere de un procedimiento de ensayo y error de modo tal, que el espaciamiento asumido satisfaga los requerimientos de drenaje establecidos.

2. Descarga máxima

El diseño hidráulico se basa en el cálculo de la máxima descarga que han de evacuar los drenes. Para condiciones de régimen permanente este valor coincide con la recarga o coeficiente de drenaje seleccionado como criterio de drenaje. Para condiciones de régimen variable la descarga

màxima, debe corresponder con la posición más alta de la napa freàtica, es decir, con la carga hidràulica màxima (H). De acuerdo con el principio enunciado en la ecuaciòn 2, la descarga màxima es:

$$Q_{\text{màx}} = \frac{6.84 \text{ K D H}}{L^2} \quad (5)$$

Conocida el àrea drenada por cada lateral ($A = l \cdot L$), donde "l" es el largo del dren y "L" el espaciamento, es posible calcular el caudal de diseño (Q en m³/dia) en funciòn de Q_{màx}, tal que $Q = A \cdot Q_{\text{màx}}$.

3. Diàmetros y pendientes

En relaciòn a este punto, en el diseño hidràulico de una tuberìa de drenaje es usual enfrentarse a una de las siguientes alternativas:

- a. Què àrea puede drenarse mediante una tuberìa de un cierto diàmetro, instalada con una determinada pendiente y sometida a una cierta recarga; o bien,
- b. Què diàmetro de tuberìa se requiere para una línea de drenaje de un cierto largo, pendiente, espaciamento y recarga.

Para una respuesta adecuada a tales alternativas es necesario considerar: ecuaciones bàsicas de flujo (uniforme) para diferentes tipos de tuberìas, ecuaciones que consideran que en una línea de drenes el caudal aumenta con el largo y un factor de seguridad para considerar una disminuciòn del diàmetro debido a un cierto grado de sedimentaciòn.

En la pràctica, para el càlculo se considera que los tubos fluyen a plena capacidad, no obstante que como ya hemos dicho el caudal aumenta hacia el extremo inferior de la línea de tubos. Para grandes descargas normalmente el flujo

es turbulento por lo que la velocidad no es proporcional al gradiente hidráulico.

Una fórmula práctica para el cálculo del diámetro más adecuado de la tubería, es la fórmula de Manning expresada de la siguiente forma:

$$d = 51.7 (C_d * A * n)^{0.375} S^{-0.1875}$$

Donde:

d	=	diámetro de la tubería (mm)
C _d	=	coeficiente de drenaje o recarga (mm/día)
A	=	área drenada por la tubería (ha)
n	=	coeficiente de rugosidad de Manning (adim.)
S	=	pendiente de la tubería (m/m)

Si no se dispone de datos proporcionados por el fabricante, se recomienda utilizar coeficientes de rugosidad de diseño (n) de 0.013 para tubos de arcilla y concreto y 0.016 para plástico. Este coeficiente aumentará si existe desalineamiento en la línea de tubos e irregularidades en la superficie del dren, tales como juntas y corrugaciones.

Por razones prácticas es conveniente utilizar tubos del menor diámetro posible. Si hubiese coincidencia entre el diámetro calculado y el disponible, se recomienda utilizar tuberías del diámetro inmediatamente superior en la sección inferior de la línea.

En relación a la pendiente de la línea de tubos, ésta debe ser la máxima permisible de acuerdo a la pendiente del terreno. En terrenos muy planos las limitaciones principales se deben a la longitud de los drenes, la profundidad de los colectores y la profundidad mínima que debe tener el lateral en su extremo superior, seleccionada como criterio de drenaje.

Las pendientes utilizadas varían entre el 1 y 3 por mil. La FAO (1980) sugiere como pendiente mínima el 0.5 por mil. El U.S. Bureau of Reclamation, recomienda que el mínimo sea de 1 por mil para evitar sedimentación. La tabla siguiente incluye otro criterio:

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

4. Disposición en terreno

La disposición de los drenes en terreno depende fundamentalmente de la topografía y de la forma del área a drenar, buscando en lo posible ser paralelos a la superficie.

Las disposiciones más usuales son: natural o al azar, paralelo, espina de pescado e interceptor.

En todo sistema de drenaje es posible diferenciar entre: laterales, colectores y principal. Los laterales son los encargados de drenar el suelo propiamente tal. Los colectores son los responsables de transportar el agua fuera del área problema. El dren principal es el cauce final donde se evacúa el agua de drenaje.

Laterales y colectores pueden disponerse en una combinación entre: tuberia-tuberia; tuberia-zanja y zanja-zanja.

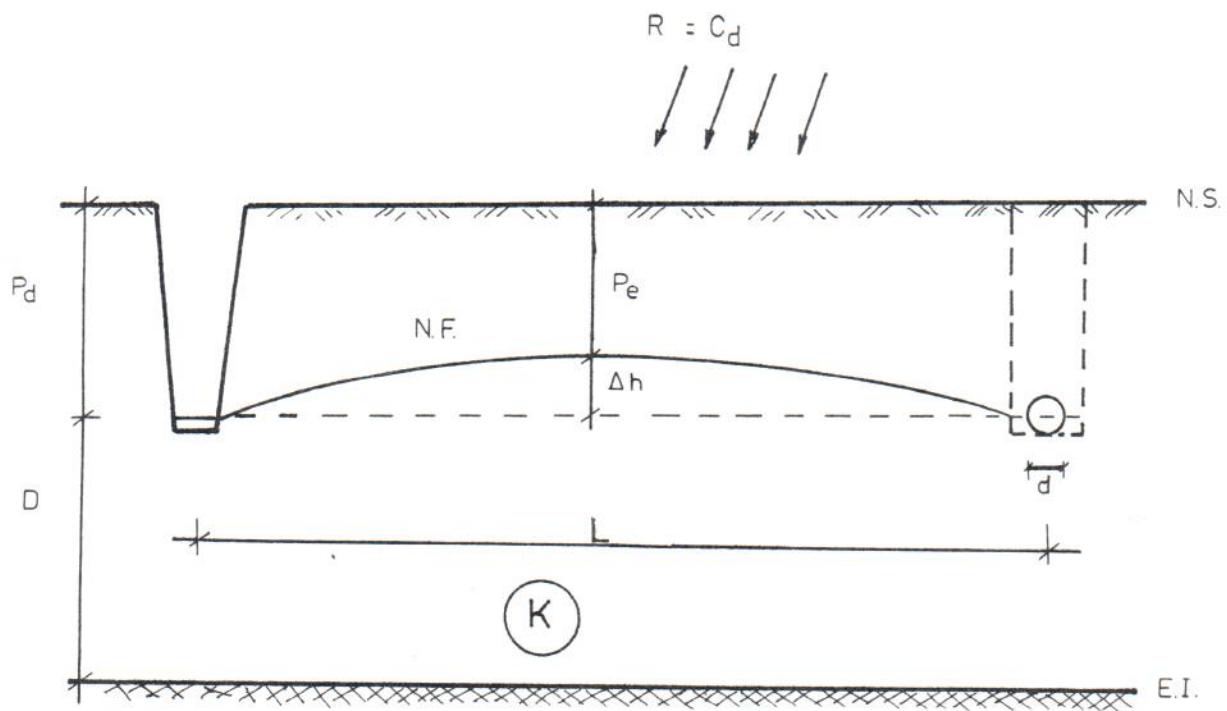


Figura 1. Esquema generalizado del drenaje subsuperficial (Flujo permanente).

- | | |
|---|-------------------------------|
| R = Recarga | Δh = Carga hidráulica |
| C_d = Coeficiente de drenaje | d = Diámetro drenes |
| P_d = Profundidad de drenes | N.S. = Nivel del suelo |
| D = Profundidad desde fondo dren a E.I. | N.F. = Nivel freático |
| P_e = Profundidad efectiva de raíces. | E.I. = Estrato impermeable |
| | L = Espaciamiento |

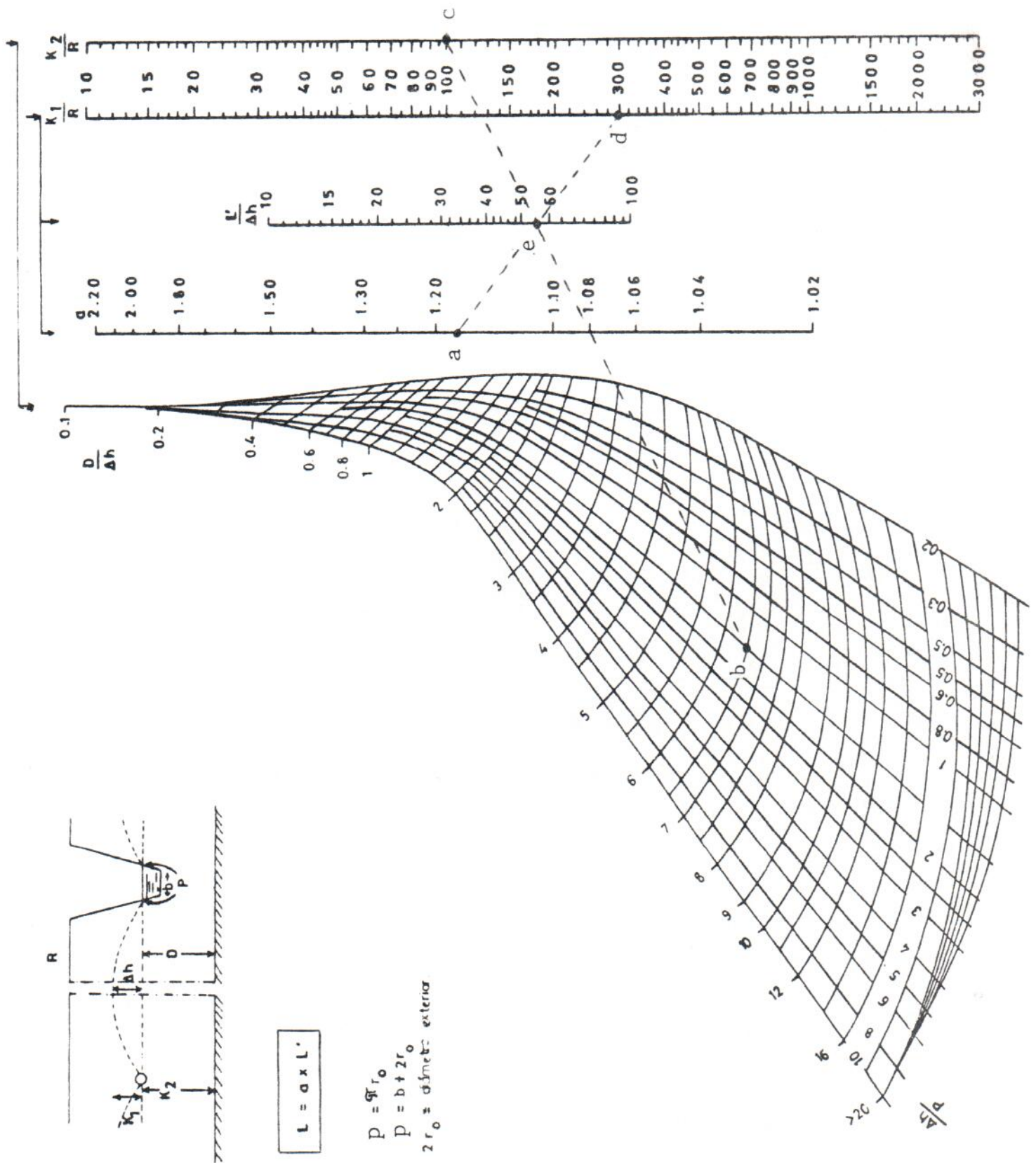


Figura 2. Nomograma para determinar el espaciamiento entre drenes según la fórmula de Hooghoudt ($L = 10-100$ m).

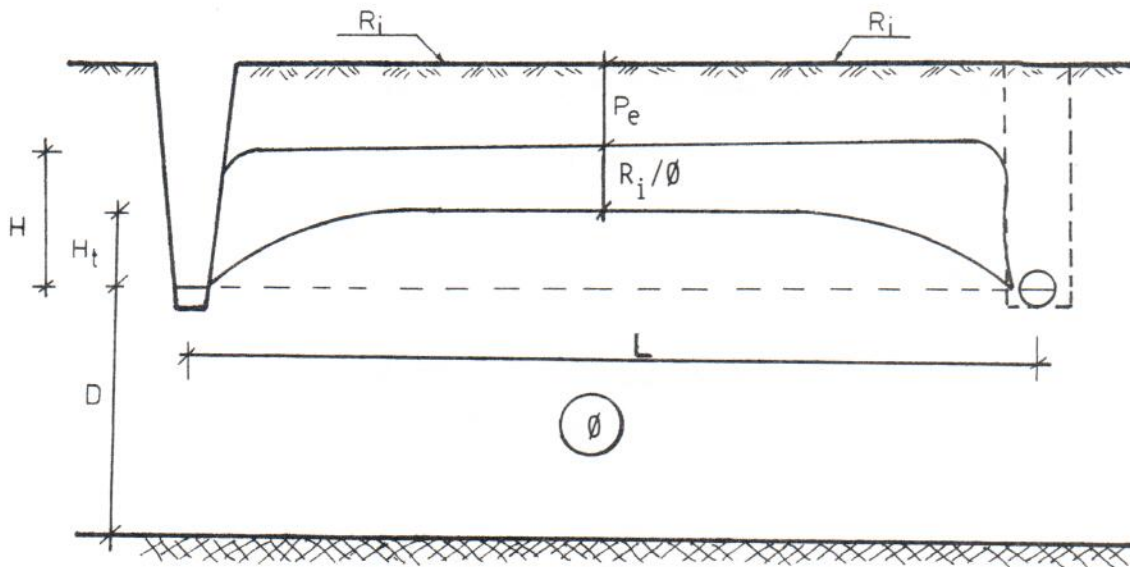


Figura 3. Esquema generalizado del drenaje subsuperficial (flujo impermanente).

- R_i = Recarga instantánea (m)
- P_e = Profundidad efectiva drenes (m)
- H = Altura del nivel freático por efecto de la recarga (m)
- H_t = Altura del nivel freático al tiempo "E" (m)
- D = Espesor del estrato transmisor de agua (m)
- \emptyset = Espacio poroso drenable (%)
- L = Espaciamiento (m)

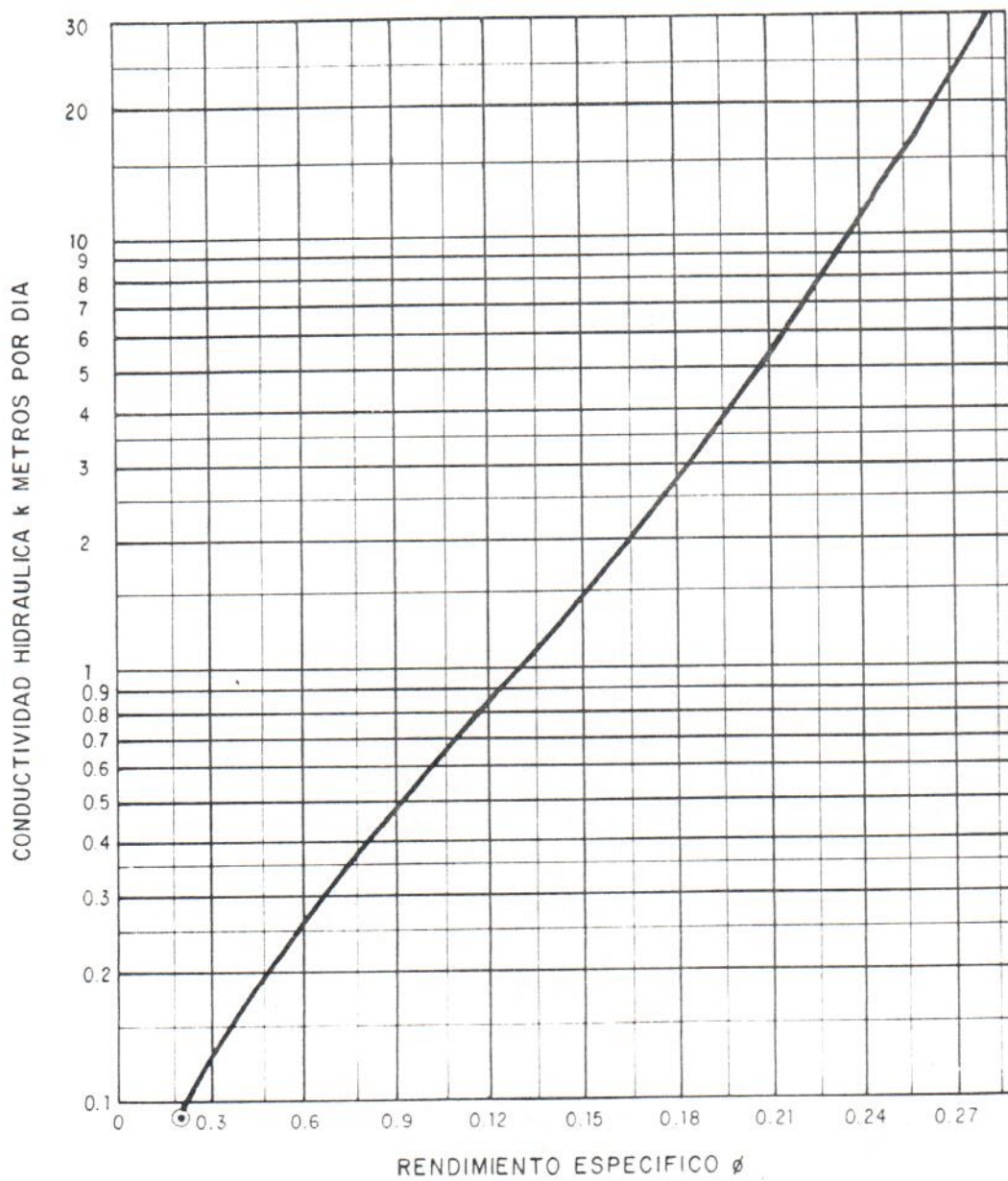


Figura 4. Relación general entre la porosidad drenable o rendimiento específico (ϕ) y la conductividad hidráulica (K).

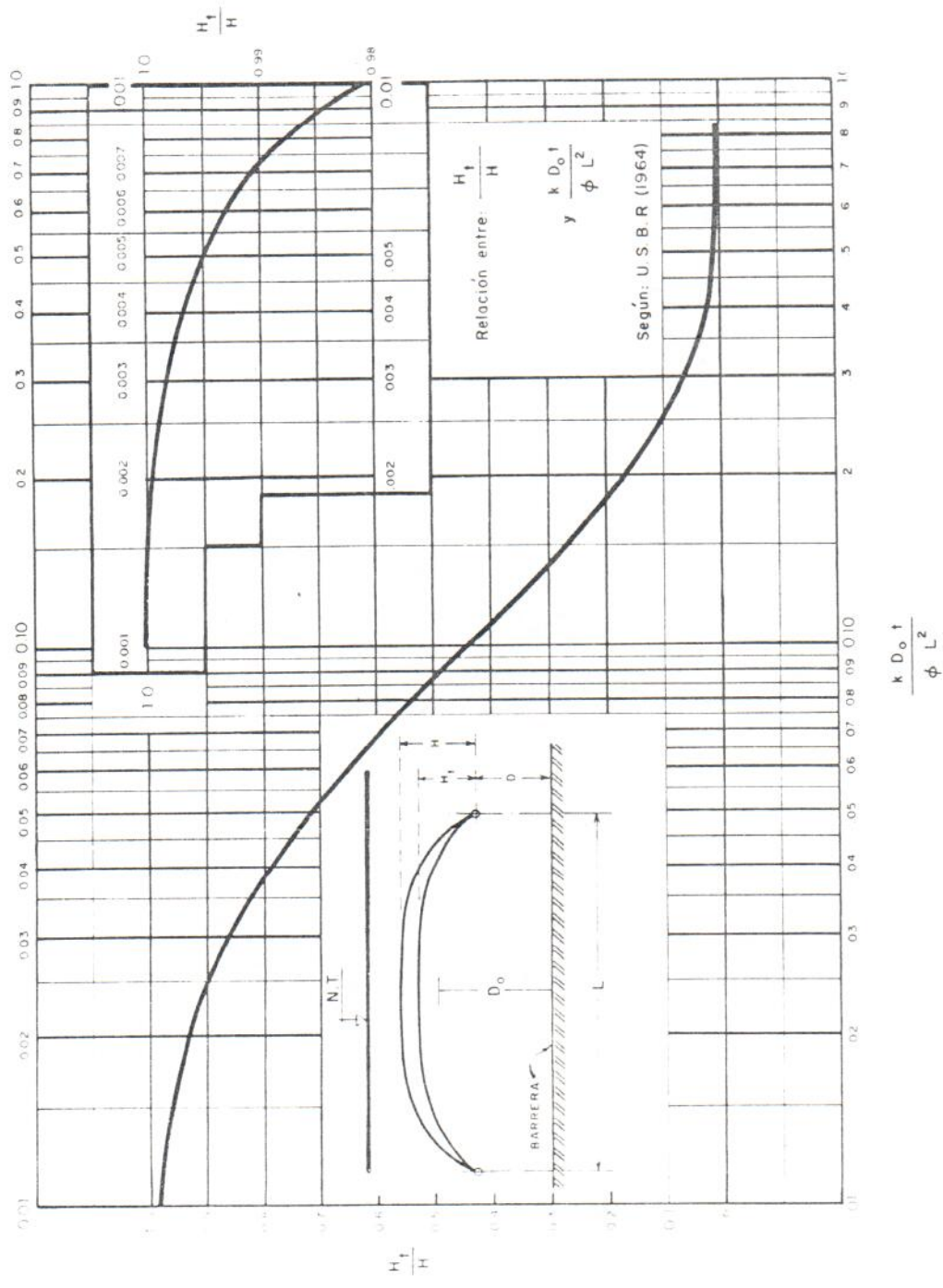


Figura 5. Nomograma para el cálculo del espaciamiento entre drenes bajo condiciones de flujo impermanente o variable.

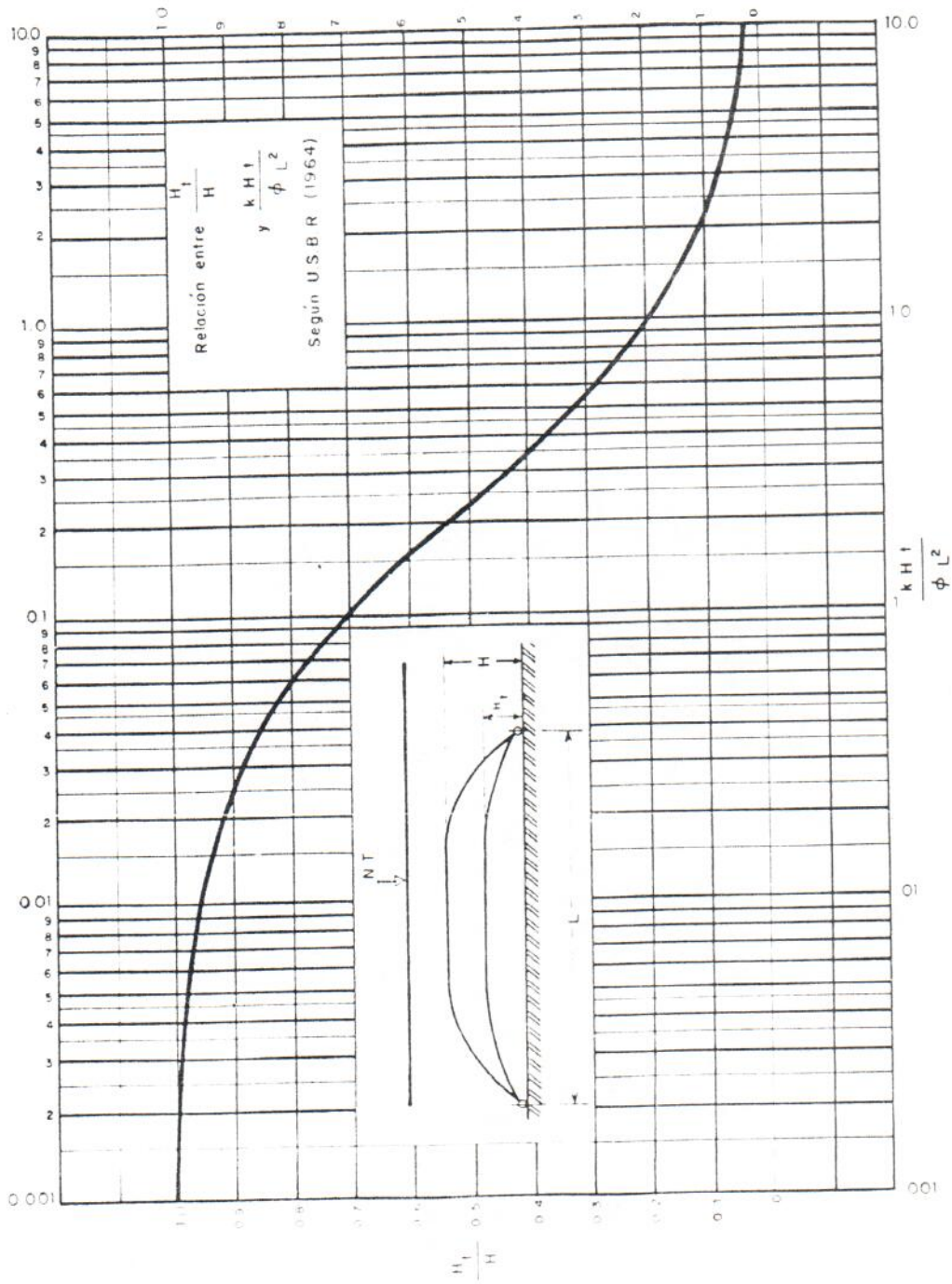


Figura 6. Nomograma para el cálculo del espaciamiento entre drenes bajo condiciones de flujo impermanente o variable.

BIBLIOGRAFIA

1. Cavelaars, J.C. 1974. Subsurface field drainage systems. In: ILRI. Drainage principles and applications. Wageningen, Holland. Vol. IV - Chapter 27. pp. 1-65.
2. De Paco, J.L. 1969. Drenaje agrícola. Teoría y bases de cálculo. Gráficas E. Casado, Madrid, España. pp. 21-78.
3. F.A.O. 1980. Drainage design factors. FAO Irrigation and Drainage Paper No 38. 52p.
4. Grassi, C.J. 1981. Manual de drenaje agrícola. CIDIAT, Venezuela. Serie de Riego y Drenaje RD-10. 165p.
5. Kessler, J. 1974. Field drainage criteria. In: ILRI. Drainage principles and applications. Wageningen, Holland. Vol. II, Chapter 11. pp. 132-164.
6. Schwab, G.O; R.K. Frevert; T.W. Edminster and K.K. Barnes. 1981. Soil and Water Conservation engineering. 3rd. edition. John Wiley and Sons, New York. pp. 314-347.
7. Wesseling, J. 1974. Subsurface flow into drains. In: ILRI. Drainage principles and applications. Wageningen, Holland. Vol. II. Chapter 8. pp. 1-56.

