

IICA



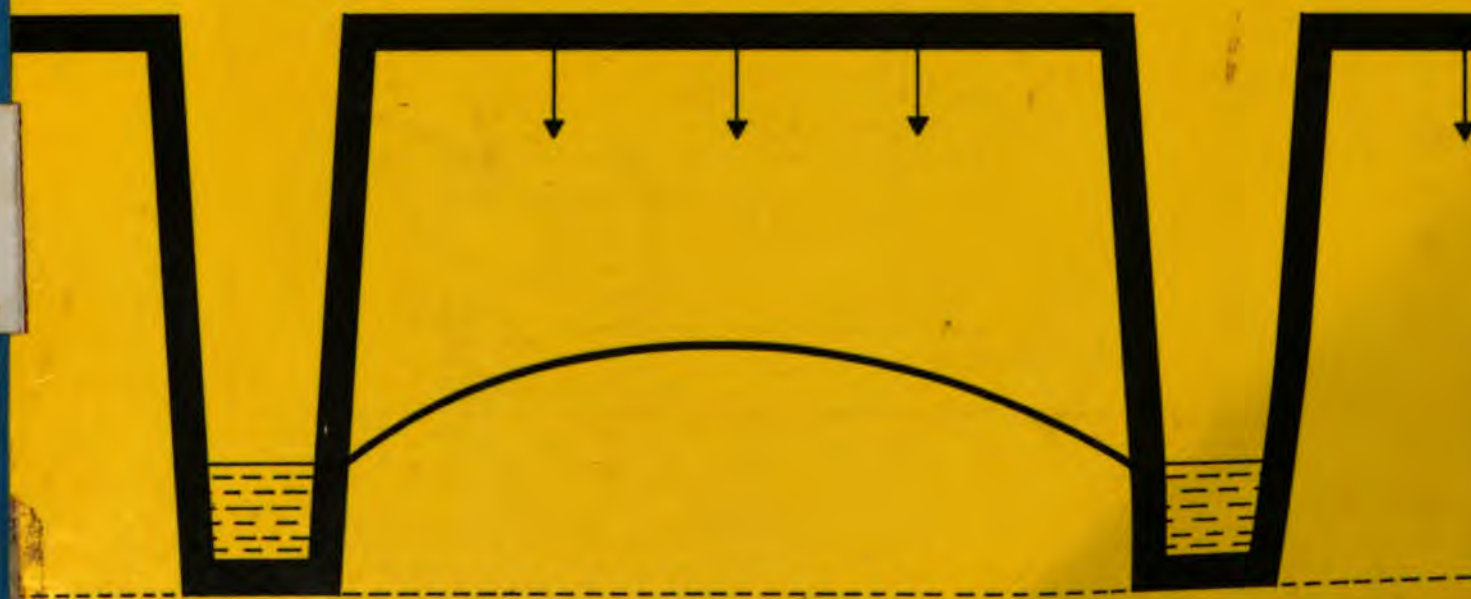
PUBLICAÇÕES MISCELÂNEAS Nº 124

DIRECCION REGIONAL PARA LA ZONA SUR
REPRESENTAÇÃO NO BRASIL
Petrolina, Pernambuco, Brasil
1974

DRENAGEM DE TERRAS AGRÍCOLAS

I - Princípios, Pesquisas e Cálculos

AGUSTÍN A. MILLAR



IICA
FM-124

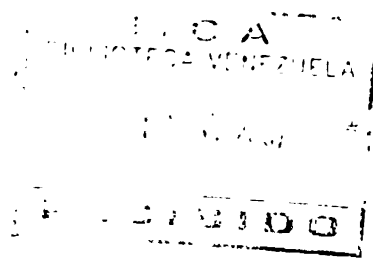
Millar, Agustín A
Drenagem de terras agrícolas. Petrolina,
SUDENE, 1974.
2v. ilustr. (IICA. Publicações miscelâ
neas, n. 124)

Acordo MINTER/IICA
Inclui bibliografia
Conteúdo.- v. 1. Princípios, pesquisas e
cálculos. v. 2. Construção, operação e manu
tenção do sistema.

1. Drenagem. 2. Irrigação. I. Série. II.
Título.

631.71

APRESENTAÇÃO



A SUDENE, através de seu Departamento de Recursos Naturais (DRN) e o Instituto Interamericano de Ciências Agrícolas (IICA) vêm trabalhando desde 1971 em um Programa de Treinamento em Irrigação no Nordeste através do Acordo MINTER/IICA.

Além de cursos operativos, o Programa considera a colaboração às Universidades nas disciplinas de Irrigação e Drenagem. A publicação deste Manual de Drenagem foi motivada, em parte, pela colaboração do Programa ao Curso de Engenharia de Irrigação realizado no Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba.

Este Manual não só é de utilidade para os estudantes das Escolas de Agronomia, como também deverá servir de subsídio técnico para o pessoal ligado aos Projetos de Irrigação do Nordeste.

O autor deseja testemunhar nesta apresentação seus agradecimentos aos Diretores do Departamento de Recursos Naturais pela sua colaboração na publicação deste Manual, traduzido em termos de pessoal de secretaria, desenhista e da gráfica em suas instalações de Petrolina, PE.

Meus agradecimentos e reconhecimentos à Secretária do DRN/EI Srta. Marilda Gomes da Costa, pelo excelente trabalho de datilografia realizado neste Manual.

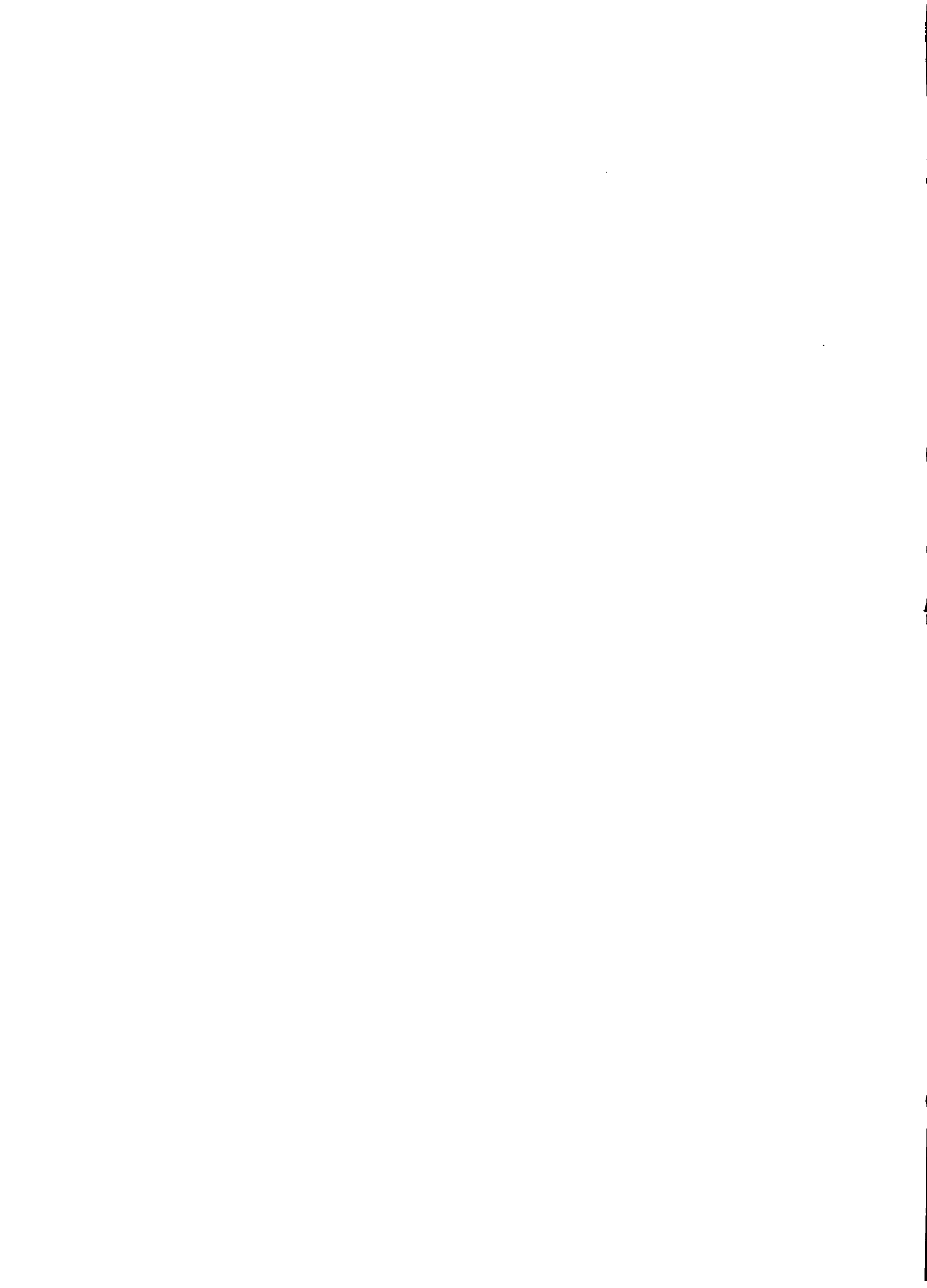
Agustín A. Millar
Especialista em Irrigação do IICA
Petrolina, Pernambuco
Outubro 1974

00000271

~~001536~~

INDICE

<u>Capítulo</u>	<u>Matéria</u>	<u>Página</u>
1	Introdução	1
2	Efeito do excesso de água sobre a planta	4
3	Contribuição de água às culturas pelo lençol freático por ascensão capilar	15
4	Princípios de fluxo saturado no solo	22
5	Drenagem superficial	35
6	Estudos e pesquisas de drenagem	42
7	Determinação da condutividade hidráulica no campo	60
8	Diagnóstico do problema de drenagem	89
9	Espaçamento de drenos	100
10	Dimensionamento do sistema de drenagem	128
	Referências bibliográficas	141
	ANEXO I. Questionários sobre os capítulos do Manual	146
	ANEXO II. Trabalhos práticos sobre drenagem	156



1. INTRODUÇÃO

Em geral a palavra drenagem significa descarga de água.

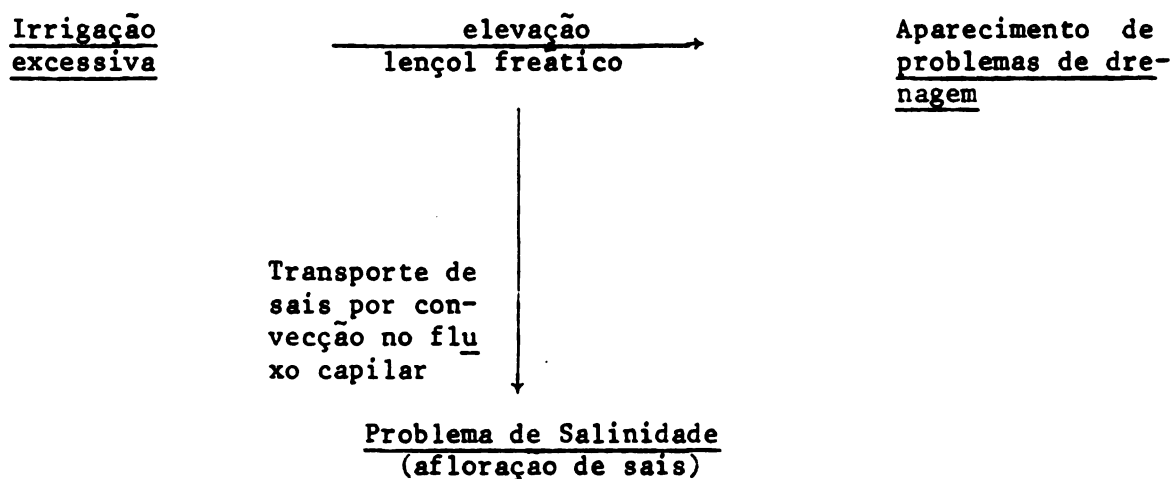
Em terras agrícolas considera-se que a água está em excesso quando interfere com a produção das culturas de tal forma que a finalidade de drenagem destas terras é a obtenção de condições ótimas para a produção agrícola.

Do ponto de vista do processo natural, drenagem é a remoção da água gravitacional da superfície do solo e da zona radicular dos cultivos.

Do ponto de vista da Engenharia, drenagem é o controle que se exerce sobre a altura do lençol freático com o objetivo de proporcionar umidade e ótima aeração para o desenvolvimento radicular das culturas.

Em zonas áridas e semi-áridas, com baixa precipitação e alta evaporação, produzem-se fenômenos de salinidade devido à falta de drenagem e irrigação mal aplicada. Se a esta situação se adiciona a presença de lençóis freáticos altos, o problema da salinização torna-se mais grave devido ao transporte de sais através do fluxo capilar.

Dado a existência de uma estreita relação nos três processos, Irrigação-Drenagem-Salinidade, devemos considerar o conjunto.



Em climas áridos e semi-áridos, a elevação dos lençóis freáticos se deve à irrigação, flutuam periodicamente, e ocorrem durante a estação de crescimento das culturas. Assim sendo, é de suma importância a aplicação da irrigação em forma adequada.

Em climas úmidos, a elevação dos lençóis freáticos se apresenta na estação

do inverno devido à maior precipitação e menor evaporação. O lençol decresce na estação do verão devido à evapotranspiração.

Um adequado controle do lençol freático, seja controlando a irrigação (alta eficiência), ou, mediante sistemas artificiais (rede de drenagem), traz os seguintes benefícios:

- a. Facilita a aeração do solo e se tem um ambiente propício para o desenvolvimento das raízes;
- b. Facilita a preparação do solo e uma semeadura precoce;
- c. Torna mais longo o período de cultivo;
- d. Obtém-se mais água disponível na zona arejada ao aumentar a profundidade do sistema radicular;
- e. Diminui a erosão do solo uma vez que se aumenta a infiltração;
- f. Favorece o desenvolvimento dos microorganismos do solo, melhorando a textura;
- g. Lava o excesso de sais do solo.

Em áreas irrigáveis, a irrigação é a principal causadora do excesso de água. Com os atuais métodos de irrigação não é possível irrigar com 100% de eficiência, em atendimento à demanda de água pelas culturas. Isto não é completamente desejável devido a que toda água de irrigação leva consigo determinada quantidade de sais, e uma certa percolação da zona radicular é sempre necessária em favor do controle da salinidade do solo.

O excesso de água proveniente da irrigação, normalmente apresenta-se como água superficial ou subterrânea. A proporção relativa depende das perdas ocorridas nos canais, métodos de irrigação usados e o tipo do solo (infiltração).

Normalmente o excesso de água superficial é menos problemático porque se pode observar e controlar, seja por melhoramento dos métodos de irrigação, ou drenagem por valas superficiais. Quando este controle não é feito, a água superficial concentra-se em áreas baixas e percola ao lençol freático agravando o problema da drenagem subterrânea.

O excesso de água devido às perdas por percolação pode provocar um lençol freático superficial em/ou toda parte da área, provocando um encharcamento d'água com efeitos semelhantes aos que ocorrem em zonas úmidas e geralmente causam uma acumulação de sais na zona das raízes ou na superfície do solo.

Muitas vezes o efeito combinado encharcamento/salinização, afetam parcial ou completamente o êxito da cultura. Devido a isto, uma eficiente drenagem subterrânea é de suma importância para a sobrevivência dos projetos de irrigação em regiões áridas e semi-áridas.

Neste Manual apresentam-se os princípios básicos sobre drenagem de terras agrícolas.

2. EFEITOS DO EXCESSO DE ÁGUA SOBRE A PLANTA

Os solos excessivamente aguados apresentam uma aeração deficiente pelo fato da água passar a ocupar parte da porosidade vazia. Esta falta de aeração afeta grandemente os rendimentos das culturas ao reduzir a taxa de oxigênio, cujo nível crítico varia com as espécies.

A fase gasosa do solo é importante para o rendimento das culturas uma vez que através dela se transporta nitrogênio, oxigênio e anidrido carbônico.

A composição do ar no solo comparada ao ar atmosférico é a seguinte:

	<u>Ar do solo</u>	<u>Ar atmosférico</u>
N ₂	79,2%	79,0%
O ₂	20,55%	20,97%
CO ₂	0,25%	0,03%

A composição do ar do solo pode variar dependendo do consumo de O₂ pela planta, da produção de CO₂ e da velocidade do movimento destes gases em direção até a atmosfera e vice-versa.

O movimento dos gases se realiza mediante o fluxo de massa (convecção) ou difusão. A difusão dos gases é o principal mecanismo para a aeração do solo, o qual se deve a uma gradiente de concentração, e de forma similar à equação de Darcy, se descreve pela lei de Fick.

$$f = -DVC \quad (\text{Primeira lei de Fick}) \quad 2.1$$

onde:

f = densidade do fluxo de massa (ML⁻²T⁻¹)

D = coeficiente de difusão (L²T⁻¹)

C = concentração (M L⁻³)

Em solos, tem-se encontrado que a difusão dos gases descrita pela lei de Fick é formulada da seguinte maneira:

$$J = -0,6 \alpha P D_o \frac{dC}{dX} \quad 2.2$$

onde P é a porosidade do solo, α é o fator de sinuosidade. Verificou-se que o fator 0,6 é um valor razoável para a sinuosidade em materiais porosos (Currie 1960). D_o é o coeficiente de difusão do gás através do ar, sendo da ordem de 1,4 x 10⁴ cm² dia⁻¹ para a maioria dos gases (Gardner 1965).

A primeira lei de Fick só é válida para difusão em equilíbrio dinâmico ou fluxo permanente.

Tal qual Darcy, Fick aplicou a lei a um fluxo variável.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\nabla \cdot f \quad (\text{Equação de continuidade}) \quad 2.3$$

Introduzindo a expressão (2.1) na (2.3) obtém-se:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla C)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C \quad 2.4$$

A relação (2.4) constitui a Segunda lei de Fick onde D é constante.

No solo, os gases podem ser consumidos ou produzidos por microorganismos e raízes. Se levarmos em conta este efeito biológico, a Segunda lei de Fick, apresentar-se-á da seguinte maneira:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C + \beta \quad 2.5$$

onde β é a quantidade de gás produzido ou consumido.

A solução da equação diferencial (2.5) depende das condições limites, das condições iniciais do sistema e da medida experimental da atividade de consumo e produção do gás.

Experimentalmente encontrou-se que a declividade da Figura 2.1 é de aproximadamente 0,66 e para valores de Y aproximadamente 10% não há difusibilidade indicando que os poros do solo não se encontram conectados entre si. A expressão para a reta da Figura 2.1 seria:

$$D/D_0 = 0,66 (Y - 10)$$

onde D_0 é o coeficiente de difusão na atmosfera livre cujos valores se podem obter em manuais, e Y é a porosidade vazia expressa em porcentagem.

Um dos aspectos importantes para o crescimento das plantas é a disponibilidade de uma quantidade adequada de oxigênio. A difusão do oxigênio até a raiz se produz tanto na fase gasosa como na líquida. A difusão na fase gasosa, nos poros, é 1.000 a 10.000 mil vezes maior que na água.

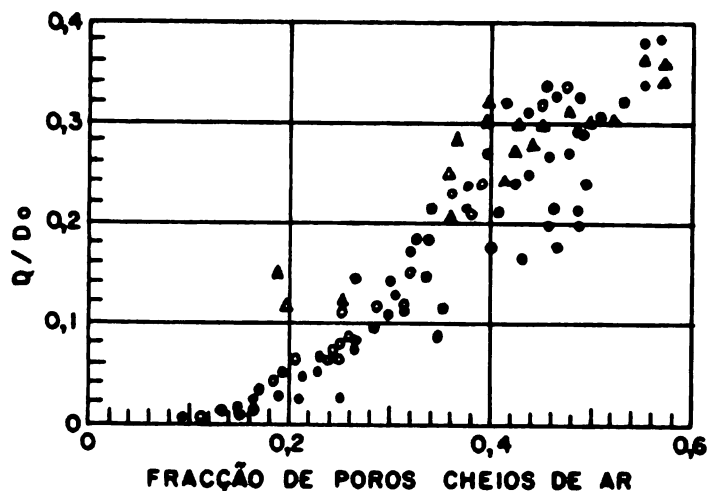


Figura 2.1. Diagrama de pontos dispersos da relação entre D/D_0 e a fracção de poros cheios de ar calculada com dados de Buckingham (1901) (●), Penman (1940) (▲), Taylor (1949) (○) e Van Bavel (1952) (▲). D_0 é o coeficiente de difusão de CO_2 no ar em repouso. D é o coeficiente de difusão do CO_2 no solo.

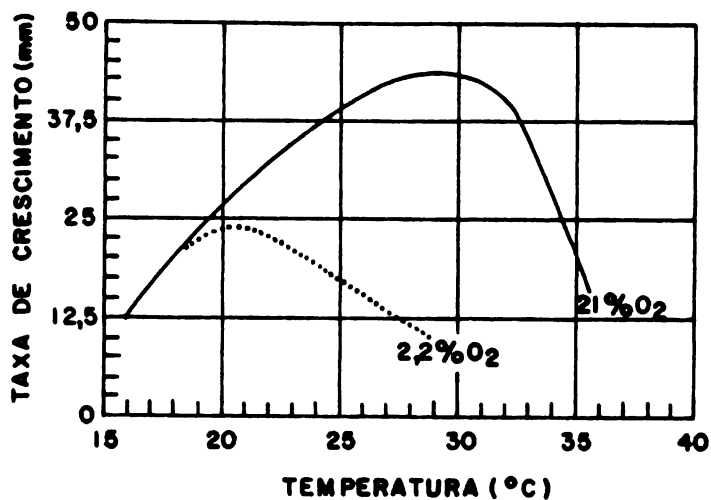


Figura 2.2. Taxa de crescimento de raízes (ordenada) de Gossypium barbadense a diferentes temperaturas (abcisa), se se tem uma pressão parcial constante de oxigênio (Cannon, 1952). A taxa de crescimento a uma pressão parcial de oxigênio depende principalmente da temperatura. A taxa máxima de crescimento a uma pressão parcial de 2,2% e de 21% ocorre a 20°C, respectivamente.

2.1. Aeração e crescimento

O oxigênio do ar do solo é importante no crescimento dos sistemas radiculares e sua demanda pelas plantas está diretamente relacionada com a temperatura. Na Figura 2.2 se encontra a taxa de crescimento de um sistema radicular em função da temperatura para duas concentrações de oxigênio. Verifica-se que existe um incremento no crescimento com relação à temperatura ambiente, mas a concentração de oxigênio é um fator limitante. Para 2,2% de O_2 a taxa de crescimento aumenta até $20^\circ C$ e logo diminui, quando o sistema radicular tem 21% de O_2 , a taxa de crescimento aumenta até $30^\circ C$, diminuindo logo depois.

Na Figura 2.3, apresenta-se uma comparação da taxa de crescimento em função da concentração de O_2 no solo e temperatura constante, para diferentes espécies vegetais. Desta Figura 2.3, se deduz que as necessidades de oxigênio variam segundo a espécie. Algumas culturas como o milho e a ervilha necessitam de elevada concentração de oxigênio (21%) para obter o crescimento máximo, em troca o arroz só mostra uma diminuição na taxa de crescimento quando a concentração de oxigênio é de 0,5%.

Informação da literatura soviética (Wesseling e Van Wijk, 1967) indica que para produzir 1 gramo de matéria seca é necessário 1 miligrama de oxigênio.

Um índice de aeração bastante empregado é a Taxa de Difusão de Oxigênio (TDO) (Letey e Stolzy, 1964; Birke et al., 1964; Stolzy e Letey, 1964). Para a maioria das plantas quando a TDO é menor que $20 \times 10^{-8} gO_2 cm^{-2} min^{-1}$ o crescimento das raízes é retido. Para obter um ótimo crescimento da planta é necessário uma TDO de $40 \times 10^{-8} gO_2 cm^{-2} min^{-1}$, aproximadamente.

A cevada começa a reter seu crescimento quando a TDO é menor que $15 \times 10^{-8} gO_2 cm^{-2} min^{-1}$, por sua vez, a beterraba açucareira é muito sensível à falta de oxigênio e não cresce quando a TDO é menor que $30 \times 10^{-8} gO_2 cm^{-2} min^{-1}$.

No Quadro 2.1 acham-se resumidas as taxas de difusão de oxigênio, críticas e ótimas, que afetam o crescimento radicular em diferentes culturas. No Quadro 2.2 se resumem as TDO, críticas e ótimas, que afetam o crescimento aéreo de diferentes culturas. Esta informação mostra que o oxigênio do solo exerce um controle amplo sobre a planta, dependendo da espécie e do estado de crescimento. Para a maioria das plantas em estado vegetativo, valores iguais ou menores que $40 \times 10^{-8} gO_2 cm^{-2} min^{-1}$ de TDO são críticos. Para os períodos de floração e frutificação as necessidades de TDO são maiores (Stolzy e Letey, 1964).

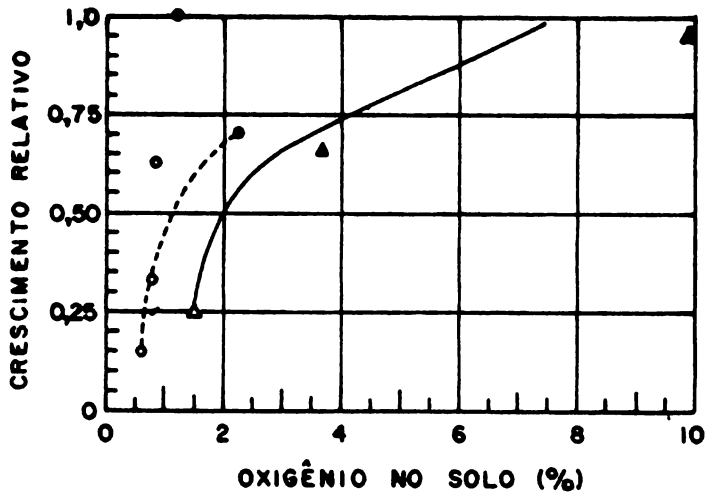


Figura 2.3. Comparação da taxa relativa de crescimento a diferentes pressões parciais de oxigênio, a uma temperatura constante para várias espécies vegetais, segundo Cannon (1925). A relação do crescimento num ambiente que tem certa quantidade de O_2 com a taxa de crescimento num ambiente que tem 21% de O_2 , é indicado na ordenada. A temperatura foi a mesma em ambos casos.

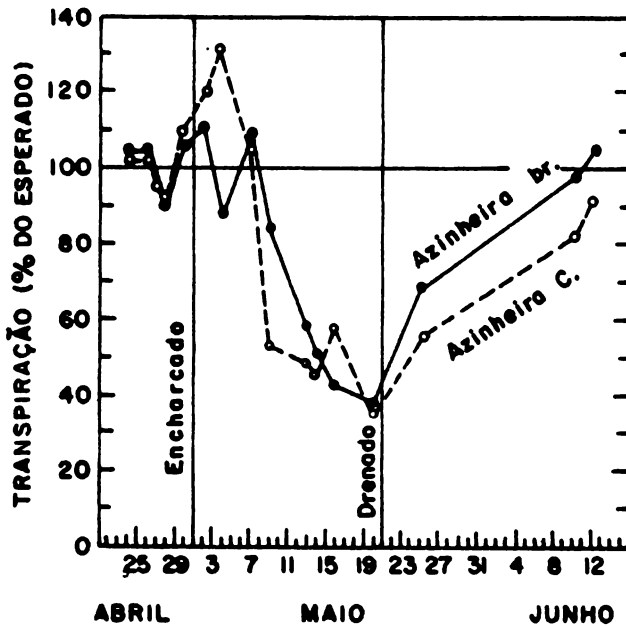


Figura 2.4. Taxa de transpiração de azinheira branca e castanha em solo encharcado. (Parker, 1950).

QUADRO 2.1. Taxa de difusão de oxigênio (TDO), críticas e ótimas, que afetam o crescimento radicular em diferentes culturas.

CULTURA	TDO x 10 ⁻⁸ (g cm ² min ⁻¹)		Referência
	Crítico	Ótimo	
Maravilha	20	-	Letey et al. (1961)
Algodão	20	-	Letey et al. (1961)
Pasto	20	40	Letey et al. (1964)
Milho	20-30	40	Bertrand e Kohnke (1957)
Beterraba açucareira	20-30	-	Wiersma e Mortland (1953)
Beterraba açucareira	30*	-	Erickson e Van Doren (1960)
Cevada	15	-	Letey et al. (1962)

* provocou 50% de redução nos rendimentos

QUADRO 2.2. Efeito da taxa de difusão de oxigênio (TDO) sobre o crescimento aéreo da planta.

CULTURA	TDO x 10 ⁻⁸ (g cm ² min ⁻¹)		Referência
	Crítico	Ótimo	
Maravilha	-	40	Letey et al. (1962)
Cevada	-	40	Letey et al. (1962)
Tomate	30	40	Lemon e Erickson (1952) Erickson e Van Doren (1960)
Ervilha	15	70	Cline e Erickson (1959)
Milho	-	25	
Milho (10 a 50 não causou diferença)			Van Diest (1962)

2.2. Aeração e processos fisiológicos

Uma aeração deficitária no solo produz, entre outros, os seguintes efeitos sobre a planta:

- a. Epistasia ou curvatura das plantas
- b. Iniciamento de raízes adventícias
- c. Perda do geotropismo
- d. Abscisão prematura das estruturas da reprodução
- e. Toxicidade de alguns elementos nutritivos. O excesso de água no solo determina uma diminuição no seu pH, fazendo com que certos elementos deste, fiquem disponíveis para a planta inclusive podendo alcançar níveis tóxicos. Entre outros, se produz uma mineralização de Fe, Co, Mn, Cu, Zn, S (Grable, 1966).

2.3. Transpiração e fotossíntese

Na Figura 2.4 se mostra o efeito do excesso de água sobre a taxa de transpiração (Parker, 1950). Depois da inundação de uma cultura se produz uma rápida redução na taxa de transpiração. Em alguns casos tem-se apresentado certas manifestações de recuperação da taxa de transpiração durante a inundação, o que tem-se relacionado com o desenvolvimento das raízes adventícias (Kramer, 1951; Parker, 1950).

A taxa de fotossíntese é afetada pelo excesso de água no solo da mesma forma que a transpiração. Em alguns casos foi observado que o efeito do excesso de água é maior que no caso da transpiração (Van't Woudt e Hagan, 1967).

2.4. Excesso de água e Rendimento das culturas

Nos itens anteriores apresentou-se o efeito nocivo que o excesso de água produz sobre alguns processos fisiológicos da planta, o que afetará também nos rendimentos.

O excesso de água predispõe o solo a permanecer com lençóis freáticos próximo à superfície, limitando o desenvolvimento normal dos sistemas radiculares das culturas. Assim, com a finalidade de se dispor de um meio adequado para o cultivo, se aplicam técnicas de drenagem com o objetivo de rebaixar o lençol freático, melhorando assim as condições de aeração do solo, o que resultará em um aumento acentuado dos rendimentos e melhor qualidade dos produtos.

No Quadro 2.3 apresentam-se os rendimentos de algumas culturas em diferentes profundidades do lençol freático. Observa-se que o rendimento das culturas aumenta à medida que o lençol freático se manteve à maior profundidade.

Na secção 3, se discute a contribuição da água desde os lençóis freáticos ao sistema radicular, o qual poderia ser manejável com a finalidade de abastecer d'água as culturas, através de irrigação subterrânea. Na secção 3, destaca-se que o meio ideal seria o abastecimento d'água às culturas, controlando o lençol freático, em quantidade igual à utilizada na evapotranspiração.

Um detalhe complementar para fins de decisão seria o conhecimento do efeito da profundidade do lençol freático sobre os rendimentos relativos. Na Figura 2.5 mostra-se este tipo de gráfico para o caso de capim. Observa-se que o rendimento ótimo, é obtido com o lençol freático a 60 cm de profundidade. Quando o lençol ficava acima de 60 cm se produzia um acentuado abatimento no rendimento relativo, o qual dever-se-ia à deficiência de aeração ou excesso d'água. Quando o lençol freático se encontrava numa profundidade maior de 60 cm, o rendimento relativo também se reduzia. Neste último caso, a causa seria o déficit de água porque ao descer o lençol freático do sistema radicular, o abastecimento de água por ascensão capilar é menor.

Na Figura 2.6 apresenta-se o mesmo tipo de gráfico para o caso da cultura da aveia. Obteve-se um maior rendimento quando o lençol freático se encontrava a 70 cm de profundidade, diminuindo para maiores ou menores profundidades aquém daquela. Esta situação viria representar o caso de fluxo permanente em que a taxa de ascensão capilar é igual à evapotranspiração da cultura.

QUADRO 2.3. Rendimento relativo de algumas culturas em diferentes condições de profundidade do lençol freático. (Van't Woudt e Hagan, 1967).

Cultura	Rendimento Relativo				
	Profundidade do lençol freático (cm)				
	40	60	90	120	150
Cevada	86,6	92,0	100,0	86,0	85,7
Trigo (inverno)	73,4	72,7	83,6	100,0	84,6
Trigo (verão)	77,3	95,9	100,0	100,0	97,5
Aveia	49,9	68,6	83,2	100,0	94,8
Beterraba açucareira	83,9	92,3	98,3	100,0	99,7
Cevada (inverno)	65,8	87,8	90,0	100,0	99,0
Cevada (verão)	76,5	91,0	97,0	99,0	100,0
Feijão	39,7	90,2	98,9	99,0	100,0
Batatas	89,6	100,0	94,0	92,3	95,4

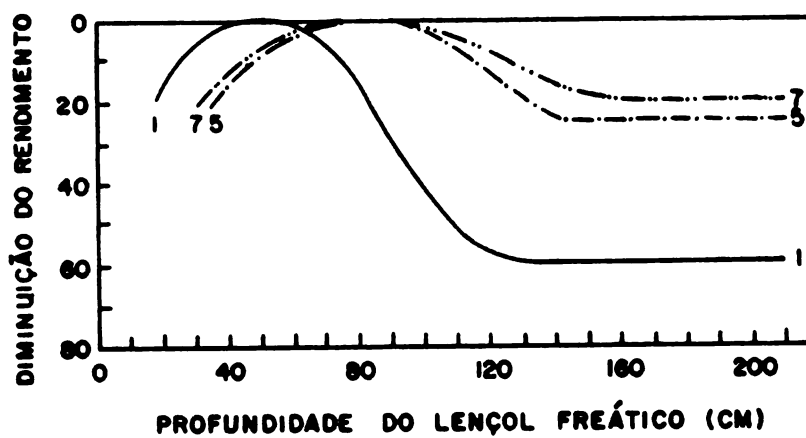


Figura 2.5. Desvio estimado do rendimento ótimo em capim em relação com a profundidade do lençol freático em diferentes solos. 1. arenoso, 5. franco, 7. argila.

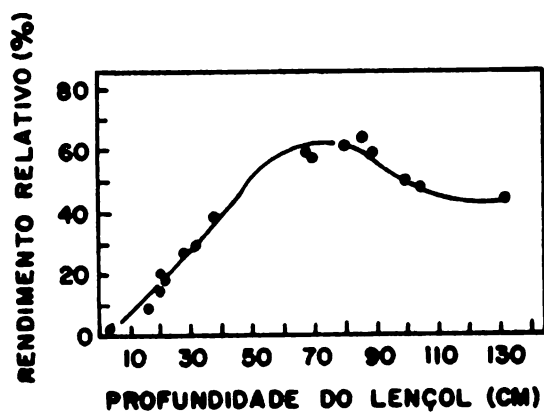


Figura 2.6. Efeito da profundidade do lençol de água sobre o rendimento de aveia num solo arenoso.

3. CONTRIBUIÇÃO DE ÁGUA ÀS CULTURAS PELO LENÇOL FREÁTICO POR ASCENSÃO CAPILAR

O processo de elevação capilar da água a partir do lençol freático até a superfície do solo pode-se analisar como um fluxo permanente, ou seja, onde a variação do conteúdo de umidade é constante com o tempo.

Após uma irrigação ou chuva, diminui o conteúdo de água dos horizontes superficiais motivado pelas perdas por evapotranspiração. Em decorrência desta situação se produz uma inversão dos gradientes do potencial ou carga hidráulica, e a água se move para cima.

Se a evapotranspiração é maior que o fluxo d'água para a superfície, o conteúdo de água dos lençóis freáticos diminuirá. Como resultado, o potencial mátrico, a carga hidráulica e o fluxo ascendente da água aumentarão. Estabelece-se, então, um balanço entre a evapotranspiração e o fluxo ascendente. Este processo continua até obter-se:

ET = Fluxo capilar

Quando se obtém esta condição, a capilaridade alcança seu valor máximo e o fluxo é permanente ($d\theta/dt = 0$) e o processo se descreve mediante a equação de Darcy para fluxo não saturado.

$$q = -k \frac{d\psi}{dZ} \quad (\text{sentido vertical}) \quad 3.1$$

Entretanto,

$$\psi = -\psi_m + Z \quad 3.2$$

Logo:

$$q = -k \frac{d}{dZ} (-\psi_m + Z) \quad 3.3$$

$$q = k \left[\frac{d\psi_m}{dZ} - 1 \right] \quad 3.4$$

onde:

q: taxa de ascensão capilar

k: condutividade capilar

ψ_m : potencial mátrico

Z: profundidade do lençol freático

É importante analisar o perfil de umidade sobre o lençol freático para a condição de equilíbrio, sem fluxo vertical, e do não equilíbrio com fluxo vertical

3.1. Perfil em condições de equilíbrio sem fluxo vertical

$q = 0$ (Fluxo vertical igual a zero)

Usando a equação (3.4) temos:

$$0 = k \left[\frac{d\psi_m}{dZ} - 1 \right] \quad 3.5$$

Da equação (3.5) se deduz que $k = 0$; então teremos:

$$\frac{d\psi_m}{dZ} - 1 = 0 \quad 3.6$$

$$\int d\psi_m = \int dZ \quad 3.7$$

$$\psi_m = Z + C \quad 3.8$$

Na superfície do lençol freático ($Z = 0$) temos que $\psi_m = 0$, o que nos permite calcular o valor da constante de integração C .

Para $Z = 0$, $\psi_m = 0$

$$0 = 0 + C, \quad C = 0$$

Logo: $\psi_m = Z + C$

$$\psi_m = Z \quad 3.9$$

Segundo a análise anterior, sob condições de equilíbrio sem fluxo vertical ($q = 0$), o potencial mátrico em qualquer ponto do perfil (sobre o lençol freático) é igual a altura sobre o lençol freático.

3.2. Perfil em condições de não equilíbrio e em presença de fluxo vertical

Esta é a situação mais comum em condições naturais devido à grande flutuação dos valores da evapotranspiração.

Tomando-se a equação (3.4), separando variáveis e integrando, obtemos:

$$\int dZ = \int \frac{d\psi_m}{1 + \frac{q}{k}} \quad 3.10$$

$$Z = \int \frac{d\psi_m}{1 + \frac{q}{k}} \quad 3.11$$

A equação (3.11) relaciona a altura sobre o lençol freático (Z), o potencial mátrico (ψ_m) e a taxa de ascensão capilar (q) sob condições de fluxo permanente.

A equação (3.11) só pode integrar-se numericamente se se conhece $k = k(\psi_m)$. Isto foi feito por Wind (1961, 1965), Talsma (1963) e Rijtema (1965) para diferentes tipos de solos e obtiveram os seguintes resultados.

A. Relação entre a altura sobre o lençol freático (Z) e o potencial mátrico (ψ_m) para diferentes taxas de ascensão capilar (q).

Na Figura 3.1 mostra-se a relação entre Z e ψ_m para diferentes taxas de ascensão capilar (q) em quatro tipos de solos (Rijtema, 1965).

Desta informação, obtida pela integração numérica da equação (3.11), pode-se tirar algumas conclusões:

- A baixos valores de q , existe uma estreita relação entre Z e ψ_m , indicando a obtenção da condição de equilíbrio, $q = 0$ onde se tem $Z = \psi_m$.
- Para determinado valor de ψ_m se observa que à medida que se aprofunda o lençol freático (aumentando Z) a taxa de ascensão capilar (q) diminui rapidamente.
- Considerando-se somente uma curva (q determinado), observa-se que a partir de um valor fixo a ψ_m , não há nenhuma relação entre Z e ψ_m , ou seja, $Z \neq Z(\psi_m)$.

B. Relação entre a taxa de ascensão capilar (q) e o potencial mátrico (ψ_m) para várias profundidades do lençol freático (Z)

Na Figura 3.2 mostra-se a relação entre q e ψ_m na parte inferior da zona efetiva das raízes para várias profundidades do lençol freático por debaixo da zona efetiva radical, para três tipos de solos (Rijtema, 1965).

Da Figura 3.2 pode-se chegar às seguintes conclusões:

- Para um determinado valor do potencial mátrico, observa-se que a taxa de ascensão capilar (q) aumenta à medida que o lençol freático permanece mais próximo da superfície do solo.
- Para um determinado valor de Z , observa-se que após um certo valor do potencial mátrico, a taxa de ascensão capilar (q) tende a permanecer constante.
- A relação entre q e ψ_m para um determinado valor Z , é do tipo exponencial.

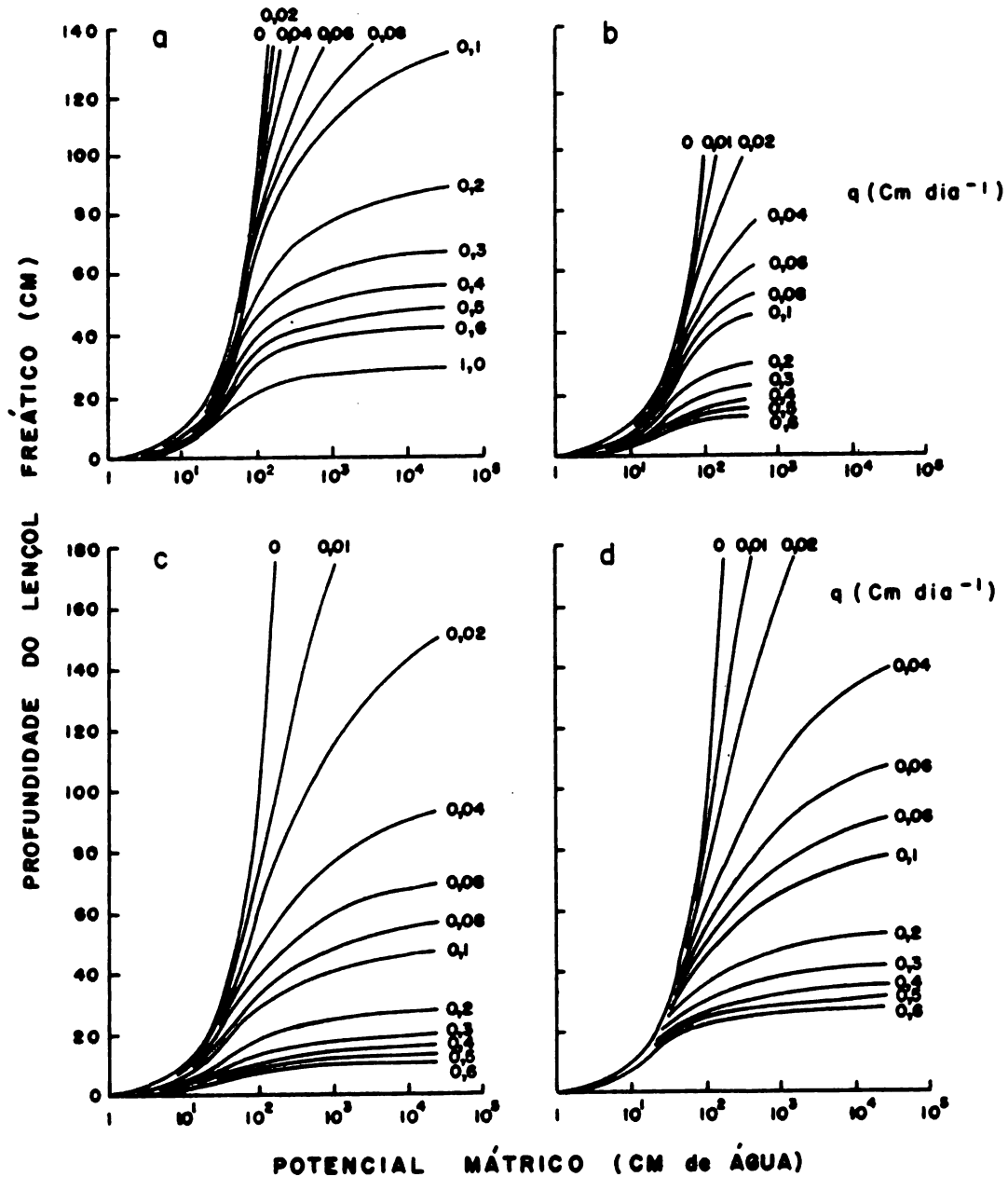


Figura 3.1. Relação entre a profundidade do lençol freático e o potencial matricico para diferentes taxas de ascensão capilar. a) Solo franco arenoso com humo, b) Solo franco arenoso, c) Solo argiloso e d) Solo peat (Rijtema, 1965).

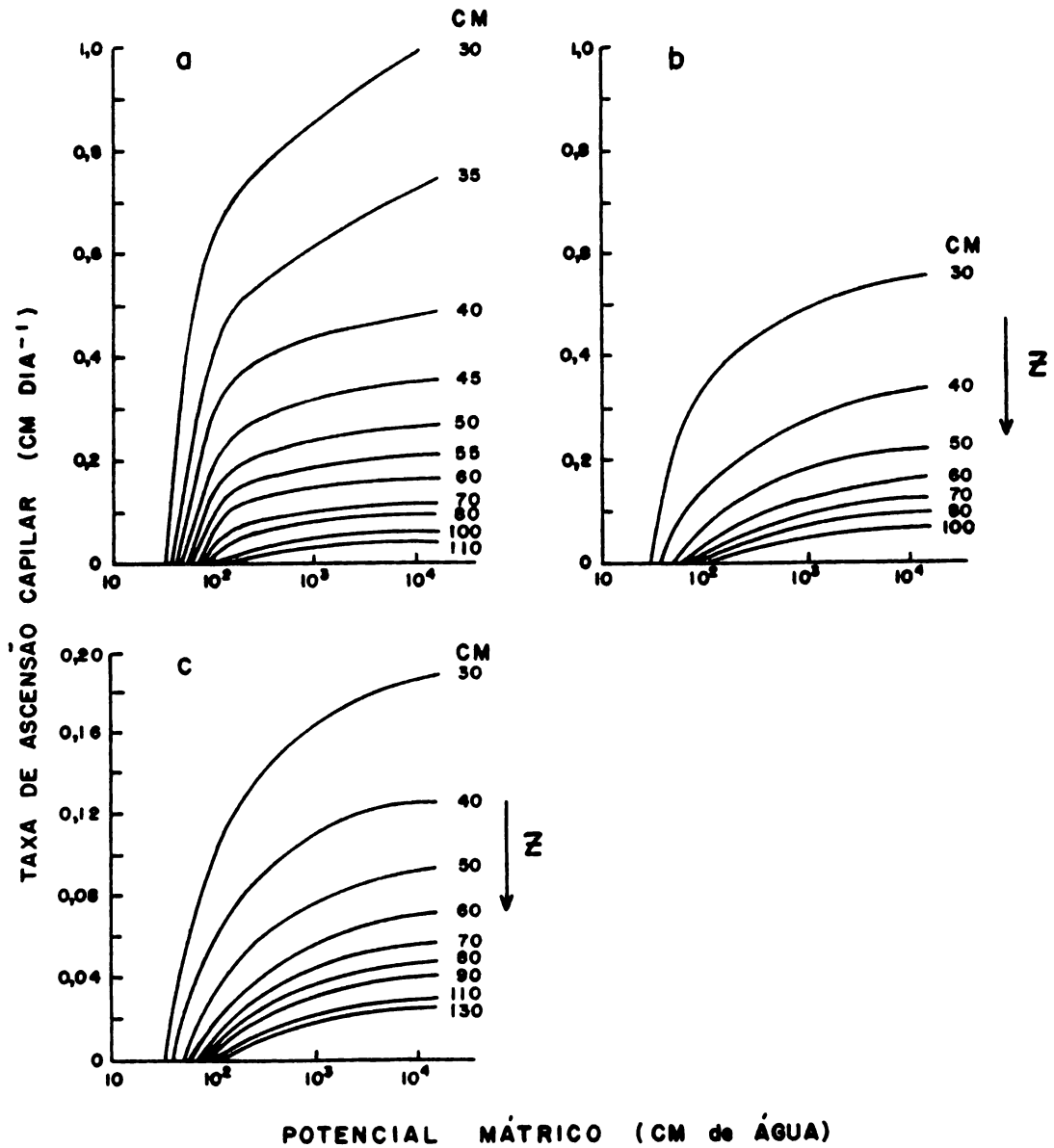


Figura 3.2. Relação entre a taxa de ascensão capilar e o potencial mátrico para várias profundidades do lençol freático. a) Franco Arenoso, b) Peat, c) Argiloso. (Rijtema, 1965)

C. Relação entre a taxa de ascensão capilar (q) e a profundidade do lençol freático (Z)

Na Figura 3.3, apresenta-se a relação entre a taxa capilar e a profundidade de do lençol freático para dois tipos de solos (Rijtema, 1965).

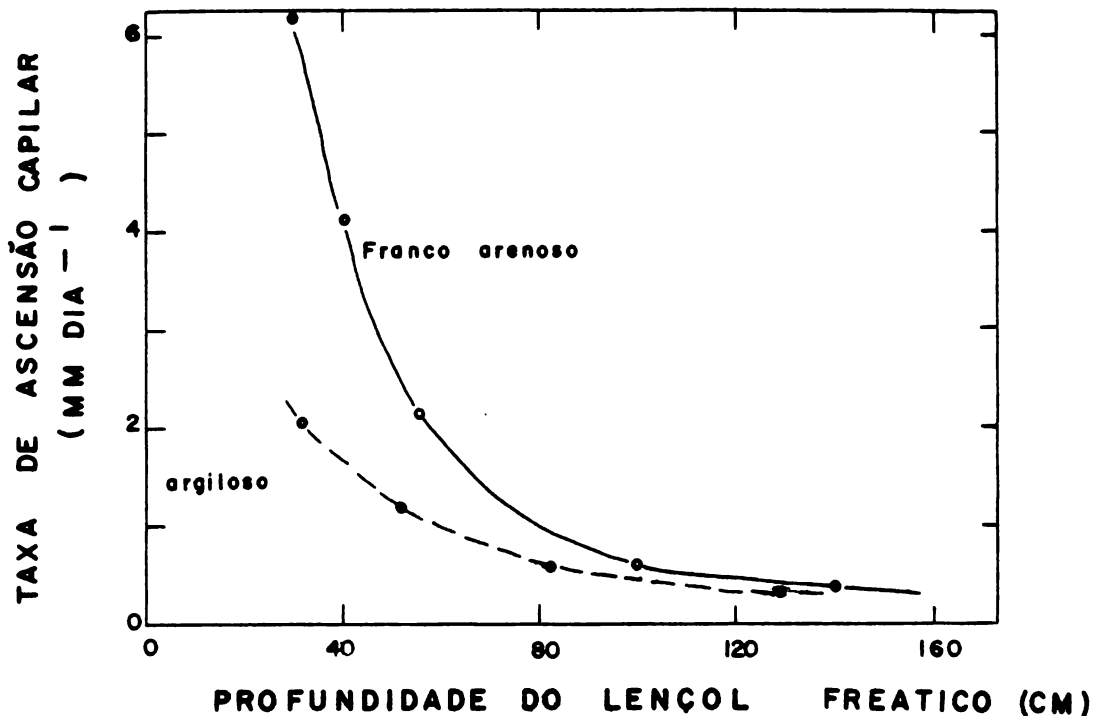


Figura 3.3. Relação entre a taxa de ascensão capilar e a profundidade do lençol freático (Rijtema, 1965).

Da Figura 3.3 pode-se verificar as seguintes conclusões:

- A taxa de ascensão capilar (q) diminui à medida que aumenta a profundidade do lençol freático (Z).
- A equação de tensão superficial ou de ascensão capilar é dada por:

$$h = \frac{4 T}{\rho g r}$$

onde h é a ascensão capilar em cm, T é a tensão superficial, ρ é a densidade da água, g é a aceleração da gravidade e r é o raio dos tubos capilares. De acordo a esta equação, a ascensão capilar é maior em solos argilosos que em arenosos, devido ao menor raio dos condutos capilares. Não obstante, para uma determinada profundidade do lençol freático, a taxa de ascensão capilar é maior em solos

arenosos que em solos argilosos. Esta diferença torna-se mais pronunciada quanto menor for a profundidade do lençol freático. A explicação para isto pode-se ter em termos de condutividade capilar. À igualdade de gradientes hidráulicos, o solo arenoso terá uma maior taxa de ascensão capilar devido a que, a condutividade capilar é maior em solos arenosos que em argilosos para potenciais maiores que -1 bar.

O tipo de informação apresentado na Figura 3.3 é de vital importância àquelas áreas onde se manejam os lençóis freáticos para abastecer de água as culturas por irrigação subterrânea, já que nos permite decidir até que ponto podemos rebaixar o lençol freático a fim de obtermos condições de fluxo permanente (Evapotranspiração igual à taxa de ascensão capilar).

4. PRINCIPIOS DE FLUXO SATURADO NO SOLO

4.1. Termos e definições

O termo água subterrânea refere-se a água no solo, no qual todos os poros estão saturados com água.

Aquela superfície onde a pressão é igual à pressão atmosférica se define como superfície ou lençol freático. Considerando que a pressão atmosférica é tida como nível de referencia zero, a pressão abaixo do lençol é positiva enquanto que a pressão sobre o lençol é negativa.

Na Figura 4.1 mostra-se a situação de um perfil de solo apresentando diferentes zonas de umidade, suas relações de pressão, e os tipos de fluxos prevalentes (Dieleman e Ridder, 1972).

A principal fonte de água no solo é a precipitação, a qual penetra verticalmente no solo em direção ao lençol freático. A água do solo pode ser removida por evapotranspiração, determinando um fluxo vertical na direção da superfície. Por baixo do lençol podem ocorrer fluxos, produto de diferenças em cargas hidráulicas. Em consequencia, a profundidade do lençol freático dependerá dos diferentes tipos de fluxo.

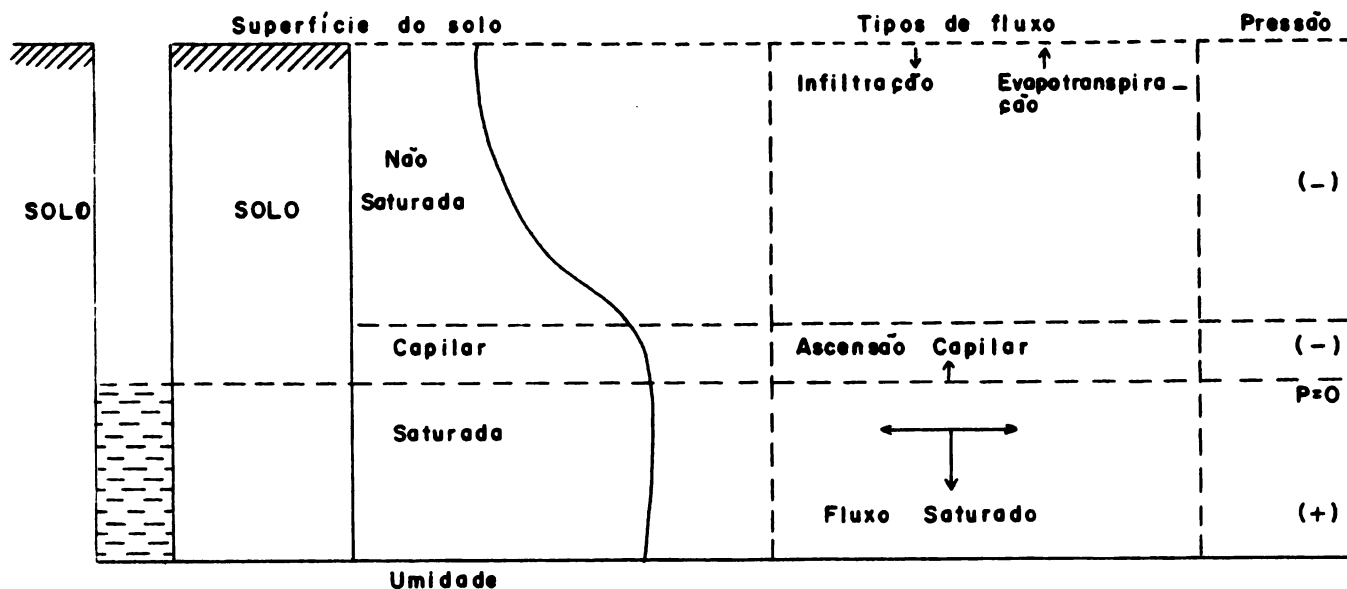


Figura 4.1. Esquema mostrando as zonas de umidade, tipos de fluxo, e pressão num perfil de solo.

4.2. Teorema de Bernouilli

Do ponto de vista hidráulico, o nível de energia da água a certa profundidade no perfil do solo fica expressa em termos de cargas hidráulicas.

O solo é um material poroso composto de capilares de diâmetro e comprimento diferentes. O nível de energia da água em qualquer ponto no perfil do solo pode-se obter aplicando, em formas semelhantes a tubulações, o Teorema de Bernouilli.

De acordo com o esquema da Figura 4.2 temos que:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + H \quad 4.1$$

onde Z é a altura geométrica ou cota do ponto considerado. $P/\rho g$ é a altura representativa da pressão, $V^2/2g$ é a altura representativa da velocidade, e H é a perda de carga hidráulica entre os pontos considerados.

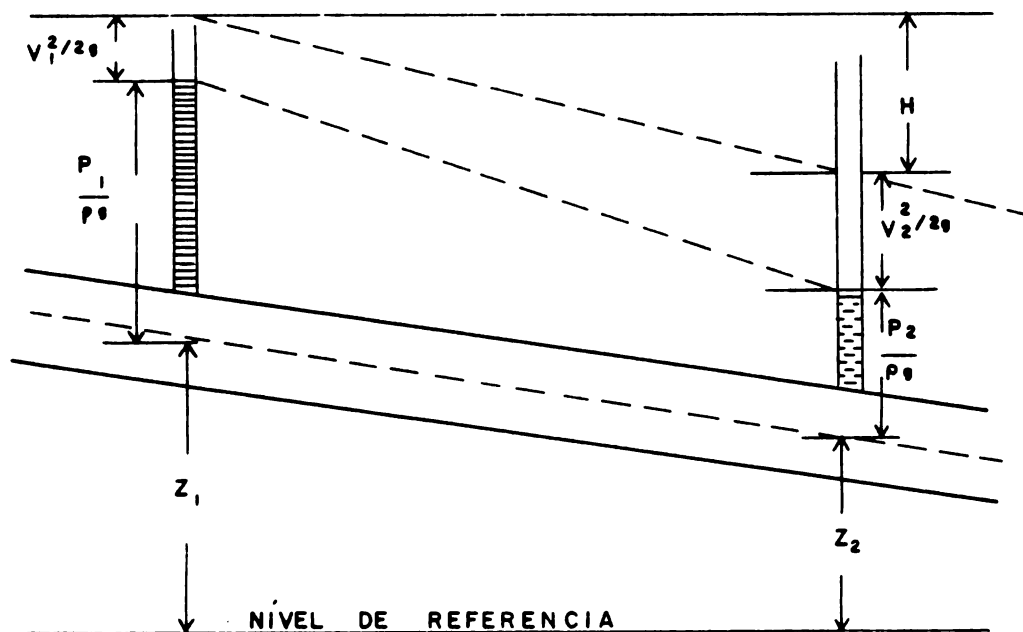


Figura 4.2. Esquema mostrando os termos do Teorema de Bernouilli

No caso do fluxo no solo, a velocidade da água é muito baixa sendo insigni

ficantes os valores da taquicarga ($V^2/2g$).

Desprezando o termo $V^2/2g$ na equação (4.1), temos:

$$H = \left(\frac{P_1}{\rho g} + Z_1 \right) - \left(\frac{P_2}{\rho g} + Z_2 \right)$$

Também

$$H = \left(\frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g} \right) + (Z_1 - Z_2)$$

o qual pode-se escrever em forma geral como

$$H = h_p + h_g$$

4.2

onde: H: carga hidráulica

hg: carga gravitacional ou de elevação

hp: carga de pressão

Definições (vide esquema na Figura 4.3)

Carga hidráulica (H): elevação de água numa tubulação aberta (piezômetro) sobre o nível de referencia. Mede-se em cm.

Carga gravitacional (hg): distancia do ponto considerado sobre o nível de referencia. Mede-se em cm.

Carga de pressão (hp): elevação de água numa tubulação aberta sobre o ponto considerado no solo. Mede-se em cm.

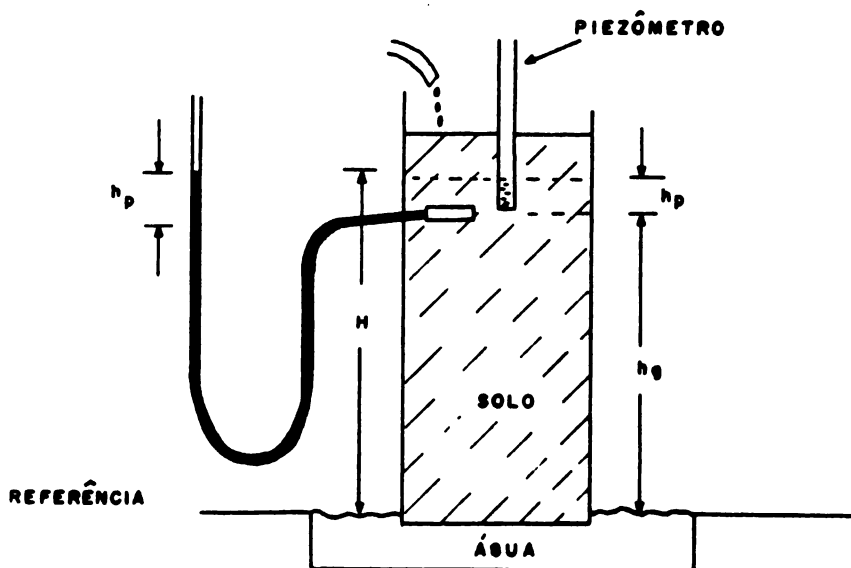


Figura 4.3. Esquema que mostra os componentes da carga hidráulica numa coluna de solo.

4.3. Movimento de água

Para que a água se movimente no solo precisam-se duas condições:

- a. Força condutora que a faça movimentar-se
- b. Meio adequado onde possa movimentar-se (poros condutores)

Em 1856, Darcy derivou uma equação baseado em suas observações do movimento de água através de camadas de areia encontrando que a velocidade de fluxo é proporcional a uma força condutora (gradiente) e à condutividade do meio poroso.

A velocidade do fluxo saturado no solo fica descrita pela seguinte relação conhecida como Lei de Darcy

$$Q = AKi \quad 4.3$$

onde Q é a vazão que passa por uma secção do solo (A), K é a condutividade hidráulica do solo e i é o gradiente de carga hidráulica.

Gradiente (i). É a força condutora que movimenta a água no solo.

$$i = \frac{\Delta H}{\Delta L}; \quad i = \frac{H_1 - H_2}{L_1 - L_2} \text{ (adimensional)} \quad 4.4$$

Introduzindo a relação (4.4) em (4.3), a equação de Darcy fica como

$$Q = A K \frac{H_1 - H_2}{L_1 - L_2} \quad 4.5$$

Condutividade hidráulica (K). É o coeficiente de proporcionalidade na equação de Darcy que expressa a capacidade de transmissão de água do meio. Do ponto de vista de drenagem é a propriedade física mais importante e característica de cada solo em particular. Para sua determinação no laboratório, utilizam-se pequenas amostras de solo. A relação básica obtem-se da aplicação direta da equação de Darcy e que é um dos exemplos clássicos de movimento de água no solo.

Considerando a importancia desta propriedade para a determinação do espaçamento de drenos, neste manual dedica-se um capítulo especial descrevendo os procedimentos de campo para sua determinação.

Movimento de água numa coluna em posição vertical (Figura 4.4)

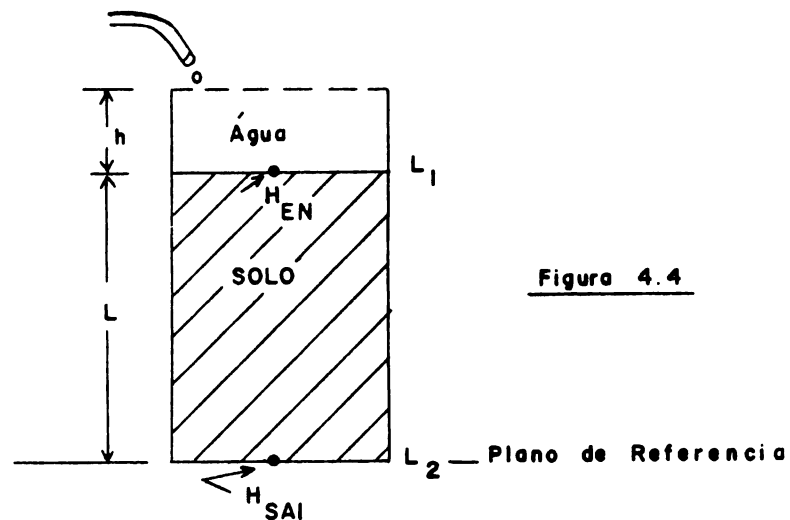


Figura 4.4

Lembrar:

- a. Carga hidráulica = Carga gravitacional + Carga de pressão (posição)

$$H = hg + H_p$$

- b. Lei de Darcy

$$v = \frac{Q}{A} = K i = K \frac{\Delta H}{\Delta L} = K \frac{H_1 - H_2}{L_1 - L_2}$$

Coluna vertical

$$\Delta H = H_{ENTRADA} - H_{SAIDA}$$

$$H_{EN} = L + h$$

$$\frac{H_{SAI} = 0 + 0}{\Delta H = H_{EN} - H_{SAI} = L + h}$$

$$\text{Gradiente: } i = \frac{\Delta H}{\Delta L} = \frac{H_{EN} - H_{SAI}}{L_1 - L_2} = \frac{L + h}{L}$$

Logo:

$$v = K \frac{L + h}{L} \text{ (coluna vertical)}$$

Considerando que: $v = \frac{Q}{A}$

$$\text{Então: } \frac{Q}{A} = K \frac{L + h}{L}$$

de onde:

$$K = \frac{Q \cdot L}{A (L + h)}$$

4.6

onde:

K: condutividade hidráulica (LT^{-1})

Q: vazão (L^3T^{-1})

L: comprimento da amostra de solo

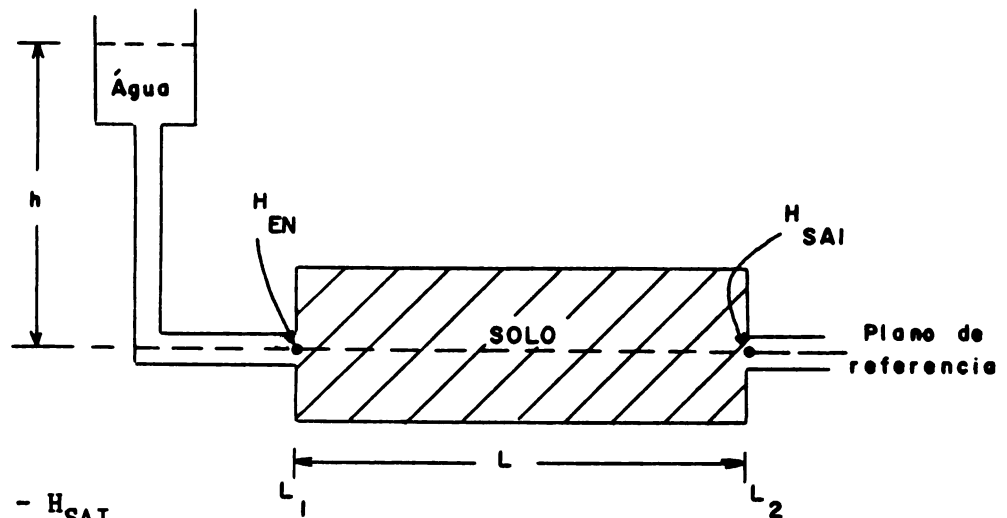
A: secção transversal da amostra (L^2)

h: carga de água (L)

A relação (4.6) se utiliza para determinar a condutividade hidráulica no laboratório quando se mantém uma carga constante de água sobre uma coluna de solo. Este procedimento constitui o método do permeâmetro de carga constante.

Movimento de água numa coluna em posição horizontal (Figura 4.5)

Figura 4.5



$$\Delta H = H_{EN} - H_{SAI}$$

$$H_{EN} = 0 + h$$

$$H_{SAI} = 0 + 0$$

$$\Delta H = H_{EN} - H_{SAI} = h$$

$$\text{Gradiente} = i = \frac{\Delta H}{\Delta L} = \frac{h}{L}$$

$$V = K \frac{h}{L} \text{ (coluna horizontal)}$$

4.7

Comparando a equação de fluxo para uma coluna em posição vertical (equação 4.6) e a equação de fluxo para uma coluna em posição horizontal (equação 4.7) con-

clui-se que o fluxo na coluna vertical é maior que na coluna horizontal num valor igual à condutividade hidráulica.

Movimento de água em solos estratificados

Nesta situação, também aplica-se a Lei de Darcy, a cada camada de solo de vido à diferença em condutividade hidráulica.

Para observar o problema e obter uma relação para o fluxo de água num solo de diferentes camadas texturais aplicaremos a Lei de Darcy nas situações seguintes:

a. Fluxo paralelo às diferentes camadas de solo

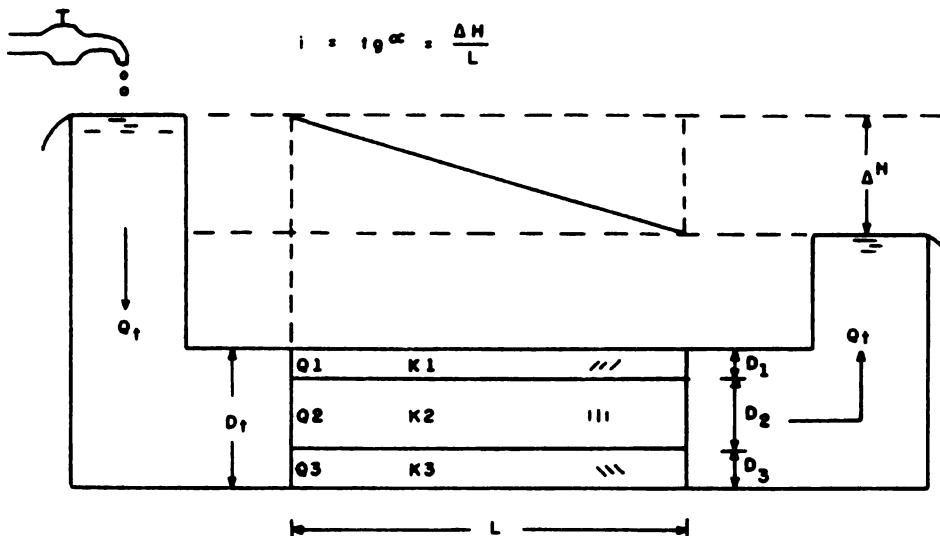


Figura 4.6. Fluxo paralelo num solo de diferentes camadas

Na Figura 4.6 o fluxo é paralelo às diferentes camadas do solo, as quais têm diferentes condutividades hidráulicas.

A Lei de Darcy, também se pode escrever como

$$Q = KD i \quad 4.8$$

em que D é a espessura da camada transmissora ou a altura da seção transversal. O fator KD se conhece como transmissividade do solo e se expressa em m^2/dia . À medida que aumenta KD , maior é a facilidade para transportar água.

Aplicando a relação (4.8) à situação da Figura 4.6, temos

$$Q_t = \bar{K} D_t i$$

onde \bar{K} é uma condutividade média das diversas camadas, $D_t = D_1 + D_2 + D_3$ e $Q_t = Q_1 + Q_2 + Q_3$

Também temos

$$Q_1 = K_1 D_1 i$$

$$Q_2 = K_2 D_2 i$$

$$Q_3 = K_3 D_3 i$$

$$\text{Como } Q_t = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$Q_t = (K_1 D_1 + K_2 D_2 + K_3 D_3) i$$

$$\text{Se, } \frac{K_1 + K_2 + K_3 + \dots + K_n}{n} = \bar{K}$$

$$\text{então } Q_t = \bar{K} D_t i$$

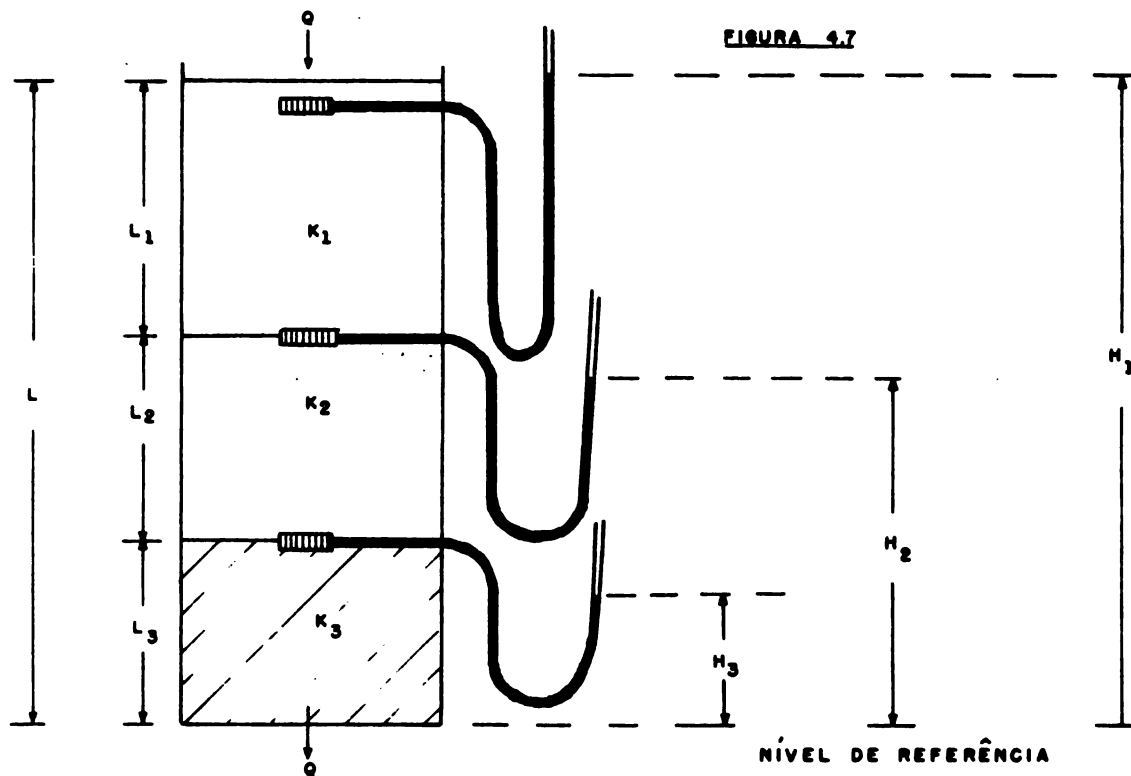
Conclui-se que no caso de fluxo paralelo num solo estratificado podem-se somar as transmissividades

$$\bar{K} D_t = K_1 D_1 + K_2 D_2 + K_3 D_3$$

ou em geral

$$(KD)_{\text{total}} = \Sigma (KD)_{\text{parciais}}$$

b. Fluxo perpendicular às diferentes camadas (Figura 4.7)



Aplicando a Lei de Darcy a cada camada:

Camada 1

$$Q_1 = K_1 \left(\frac{H_1 - H_2}{L_1} \right) \cdot A$$

$$Q_1 \frac{L_1}{K_1} = (H_1 - H_2) A$$

Camada 2

$$Q_2 = K_2 \left(\frac{H_2 - H_3}{L_2} \right) \cdot A$$

$$Q_2 \frac{L_2}{K_2} = (H_2 - H_3) A$$

Camada 3

$$Q_3 = K_3 \left(\frac{H_3 - 0}{L_3} \right) \cdot A$$

$$Q_3 \frac{L_3}{K_3} = (H_3 - 0) A$$

Considerando todo o perfil, obtemos

$$Q_1 \frac{L_1}{K_1} + Q_2 \frac{L_2}{K_2} + Q_3 \frac{L_3}{K_3} = A \left[(H_1 - H_2) + (H_2 - H_3) + (H_3 - 0) \right]$$

$$Q_1 \frac{L_1}{K_1} + Q_2 \frac{L_2}{K_2} + Q_3 \frac{L_3}{K_3} = A \cdot H_1$$

A água que penetra no extremo superior (Q) é a mesma que passa pelas diferentes camadas. Assim, temos que

$$\text{Fluxo camada 1} = \text{Fluxo camada 2} = \text{Fluxo camada 3}$$

$$Q_1 = Q_2 = Q_3$$

Logo, pode-se escrever:

$$Q \left(\frac{L_1}{K_1} + \frac{L_2}{K_2} + \frac{L_3}{K_3} \right) = H_1 A$$

$$\frac{Q}{A} = \frac{H_1}{\frac{L_1}{K_1} + \frac{L_2}{K_2} + \frac{L_3}{K_3}} \quad 4.9$$

A equação de Darcy (4.5) expressa

$$\frac{Q}{A} = K \frac{H}{L} \quad 4.10$$

Comparando as equações (4.9) e (4.10), obtem-se que:

$$\frac{K}{L} = \frac{1}{\frac{L_1}{K_1} + \frac{L_2}{K_2} + \frac{L_3}{K_3}}$$

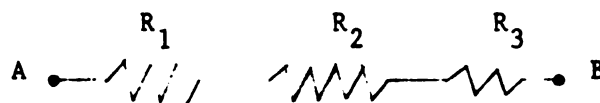
de onde pode-se escrever uma condutividade hidráulica aparente para todo o perfil.

$$K_{\text{aparente}} = \frac{L}{\frac{L_1}{K_1} + \frac{L_2}{K_2} + \frac{L_3}{K_3}}$$

O termo L/K representa a resistencia da camada ao fluxo de água.

Da análise anterior conclui-se que no caso do fluxo perpendicular às diferentes camadas de solo as resistências se podem somar.

O caso do fluxo de água em solos com diferentes camadas e semelhante ao caso do fluxo de corrente através de um circuito de resistências em séries.



A lei de Ohm expressa que a queda de potencial (voltagem) entre AB (V_{AB}) é proporcional ao produto da intensidade da corrente (I) e a resistência (R) entre A e B.

$$V_{AB} = IR = I (R_1 + R_2 + R_3)$$

$$I = \frac{V_{AB}}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{V_{AB}}{R} = \frac{V_A - V_B}{R} = \frac{\Delta V}{R}$$

Similitude entre a Lei de Darcy e Ohm

$$\text{DARCY}$$

$$Q = K \frac{\Delta H}{\Delta L} \cdot A$$

Q Fluxo
K Condutividade

$\frac{\Delta H}{L}$ Gradiente

$$\text{OHM}$$

$$I = \frac{1}{R} \Delta V = k'A \frac{\Delta V}{L}$$

$$\frac{1}{R} = k = \frac{k'A}{L}$$

k é a condutividade do metal e k' sua condutividade específica

$\frac{\Delta V}{L}$

A similitude entre o movimento de água em solos (Lei de Darcy) e o movimento de elétrons entre dois polos opostos (Lei de Ohm) utiliza-se na solução de problemas de drenagem através do estudo de analogias elétricas.

4.4. Direção do fluxo

Antes de falarmos na direção do fluxo, convém que se conheça o significado de uma série de termos relacionados com o subsolo.

Solo homogêneo. É um solo relativamente uniforme em suas características físicas, especialmente texturais e estruturais, numa profundidade de 10 metros ou mais.

Solo heterogêneo. Aquele em que as características variam consideravelmente. A maioria dos solos caem dentro desta categoria.

Solo isótropo. Quando a condutividade hidráulica é a mesma tanto no sentido vertical como horizontal.

Solo anisótropo. Aquele que apresenta diferenças em condutividade hidráulica no sentido vertical a respeito do horizontal. Na maioria dos casos, a condutividade hidráulica é maior no sentido horizontal do que no vertical devido a micro-estratificações.

O movimento da água no solo deve-se a um gradiente hidráulica na direção das cargas hidráulicas decrescentes. A água se move em direção aos drenos porque estes constituem um centro de baixa pressão, cuja velocidade de transmissão depende da condutividade hidráulica e do gradiente.

A instalação de uma série de piezômetros a diferentes profundidades, sobre uma linha normal a um dreno, permite traçar, por interpolação, as linhas equipotenciais ou isopiezométricas.

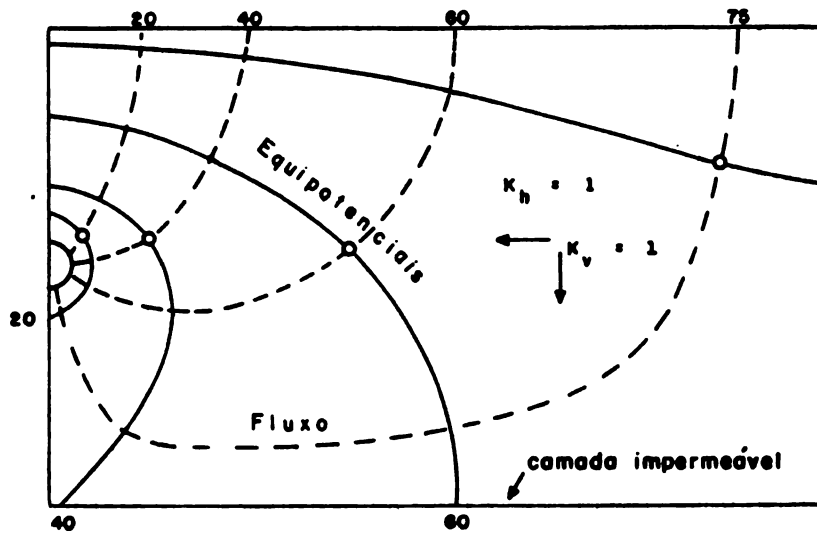
Linha equipotencial. É a que une todos os pontos que apresentam o mesmo valor de carga hidráulica.

Linha de fluxo. É uma representação gráfica do caminho de uma molécula de água para os drenos.

No caso de um solo isótropo ($K_h = K_v$), as linhas de fluxo serão perpendiculares às linhas equipotenciais (Figura 4.8).

Se o solo for anisótropo ($K_h \neq K_v$), as linhas de fluxo não serão perpendiculares às equipotenciais, uma situação muito comum em drenagem (Figura 4.8).

SOLO ISÓTROPO



SOLO ANISÓTROPO

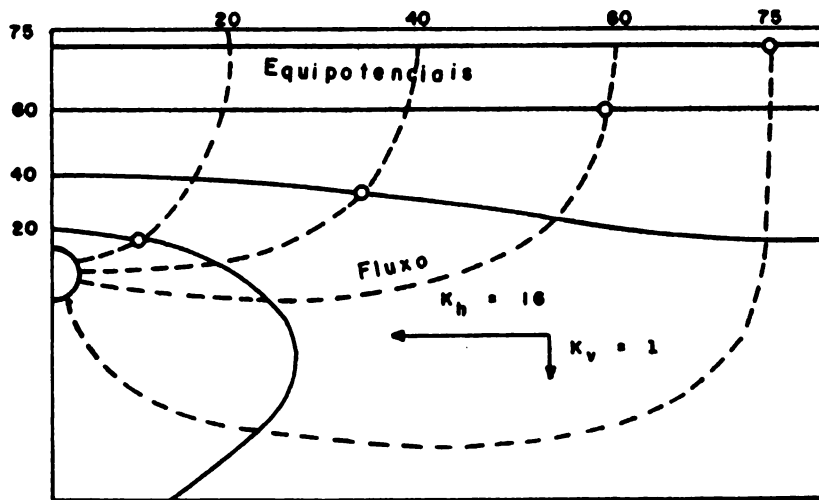


Figura 4.8. Linhas equipotenciais e de fluxo em solos isótropos e anisótropos.

5. DRENAGEM SUPERFICIAL

5.1. Ciclo de Escoamento

A precipitação é o fator principal que determina a descarga. A maior parte da água caída na primeira fase de uma chuva fica retida pela cobertura vegetal e armazenada em depressões superficiais. Se a chuva continua, a superfície do solo se cobre com uma lâmina de água chamada retenção superficial e a água que começa a movimentar-se para um curso superficial natural chama-se escoamento superficial.

Ciclo de escoamento é o termo descritivo aplicado à parte do ciclo hidrológico entre a precipitação incidente e o deflúvio.

Na Figura 5.1 apresenta-se um diagrama esquemático da distribuição de uma chuva. Nesta, observa-se que a intensidade de retenção pela cobertura vegetal, a velocidade do armazenamento nas depressões e a deficiência na umidade do solo, diminuem rapidamente e tornam-se insignificantes antes do início de um escoamento superficial apreciável.

Desta forma, o balanço da água superficial pode-se escrever da seguinte forma:

$$\text{Chuva} = \text{infiltração} + \text{escoamento} \quad 5.1$$

O anterior está demonstrando que o solo através de sua capacidade de infiltração está controlando o volume de escoamento. Em geral, pode-se dizer, comparativamente quanto a cobertura, declividade, etc., que solos com menor infiltração (argilosos) tem maior escoamento que solos arenosos.

Para eliminar a água superficial, produto do escoamento, temos de dispor de um sistema de drenagem superficial. Os dados dos escoamentos máximos numa bacia são de importância para o dimensionamento do dreno coletor na saída da bacia.

Uma forma de determinação dos escoamentos máximos numa bacia é mediante o uso do método racional.

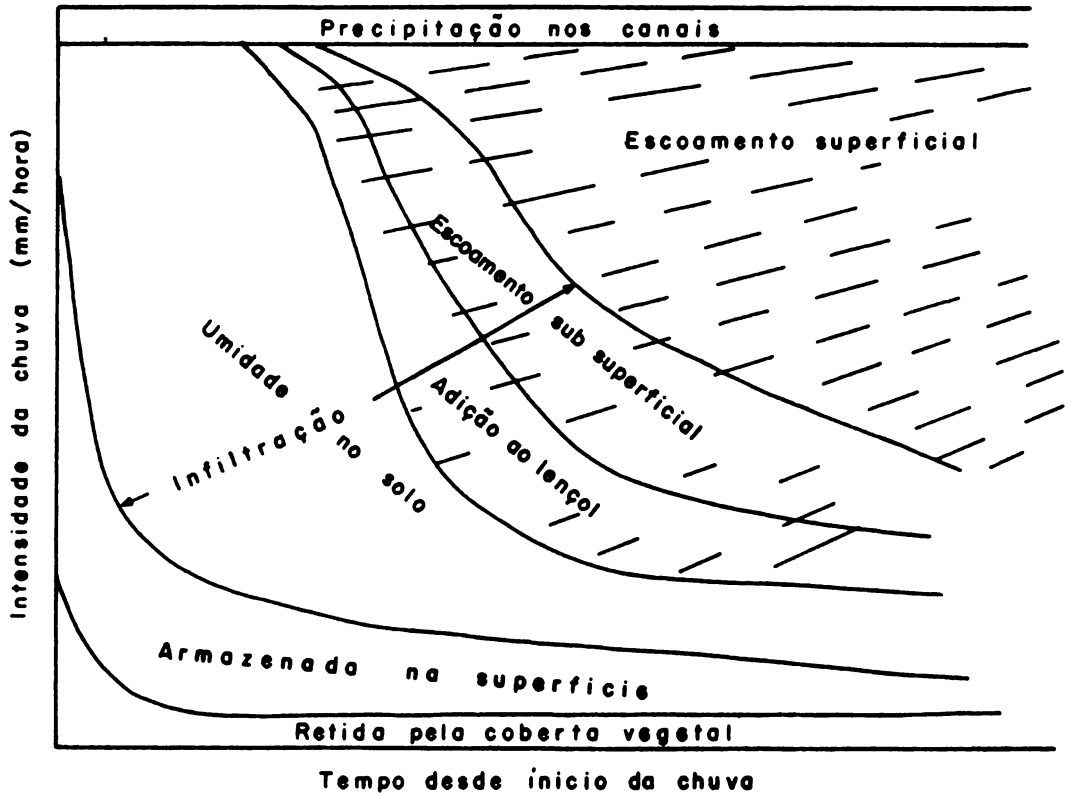


Figura 5.1. Diagrama esquemático da distribuição de uma chuva. A área marcada representa o deflúvio total.

5.2. Método racional

Este método permite fazer estimações das descargas máximas do escoamento com base nas intensidades máximas da precipitação.

Para a elaboração da equação fundamental deste método, assumiu-se que a descarga do escoamento máximo, Q , é diretamente proporcional à intensidade máxima da precipitação (I) no tempo de concentração, e à área da bacia.

O tempo de concentração representa o tempo que leva uma partícula de água para movimentar-se do ponto mais longe até o ponto da saída da bacia. Quando houver transcorrido este tempo, toda a bacia está contribuindo simultaneamente na formação da descarga de escoamento, e esta terá seu valor máximo.

O coeficiente de proporcionalidade (C) chama-se "coeficiente de escoamento" e representa a relação entre o escoamento e a precipitação. Este coeficiente varia com as características físicas e topográficas da bacia, e com a cobertura vegetal da mesma.

A equação racional tem a seguinte forma:

$$Q = \frac{C I A}{360} \quad 5.2$$

onde Q é a vazão em m^3/seg , A é a área da bacia em hectares, C é o coeficiente de escoamento, e I é a intensidade máxima de chuva em mm/hora .

Nesta equação supões-se que a precipitação é uniforme e ocorre com uma intensidade uniforme durante um período igual ou maior que o tempo de concentração, e que a intensidade da precipitação é uniforme sobre toda a área da bacia. Estas suposições não são exatamente válidas, porque o uso do "método racional" só se limita a bacias pequenas, 100 a 200 has.

Coeficiente C. O Quadro 5.1 mostra os valores do coeficiente de escoamento C em função do tipo de solo, declividade e coberta vegetal.

QUADRO 5.1. Valores de C em função do solo, declividade e cobertura vegetal

Declividade (%)	solos arenosos	solos francos	solos argilosos
	<u>Florestas</u>		
0 - 5	0,10	0,30	0,40
5 - 10	0,25	0,35	0,50
10 - 30	0,30	0,50	0,60
	<u>Pastagens</u>		
0 - 5	0,10	0,30	0,40
5 - 10	0,15	0,35	0,55
10 - 30	0,20	0,40	0,60
	<u>Terras cultivadas</u>		
0 - 5	0,30	0,50	0,60
5 - 10	0,40	0,60	0,70
10 - 30	0,50	0,70	0,80

Tempo de concentração. O tempo de concentração pode calcular-se mediante a seguinte fórmula:

$$T_c = 0,0256 K^{0,77} \quad 5.3$$

$$K = \frac{L}{S} = \sqrt{\frac{L^3}{H}} \quad 5.4$$

onde T_c : tempo de concentração, em minutos

L: comprimento máximo percorrido pela água, em metros

S: declividade geral da bacia = $\frac{H}{L}$

H: diferença de altura entre o ponto mais longe e o ponto de saída da bacia, em metros.

A intensidade (I) da precipitação que se utiliza na equação racional é a intensidade máxima que ocorre com uma duração igual ao tempo de concentração. A eleição da frequência desta intensidade máxima dependerá da finalidade da estrutura que se deseja projetar e os riscos que poderiam implicar uma possível falha da estrutura.

Para obter os valores de I será necessário fazer uma análise da intensidade, duração e frequência da precipitação na área sob estudo.

5.3. Método de McMath

O método de McMath para determinar a descarga máxima causada por escoamento de chuvas intensas representa uma modificação do método racional (Linsley, Kohler e Paulhus, 1967). Esta equação tem sido utilizada com êxito na região de "San Lorenzo" no Perú, cujo clima é semelhante ao do Nordeste do Brasil.

A equação tem a seguinte forma:

$$Q = 0,0283 C I A^{4/5} S^{1/5} \quad 5.5$$

onde Q: vazão de escoamento (m³/seg) com frequência média de excedência de uma vez por X anos

C: coeficiente de escoamento de McMath (vide Quadro 5.2)

I: intensidade da chuva (polegadas/hora) para o tempo de concentração T_c

A: área (acres) da bacia à montante do ponto considerado

S: declividade média (%) do dreno principal

Coeficiente de escoamento. O coeficiente de escoamento C está composto de 3 fatores parciais: $C = C_1 + C_2 + C_3$, os quais se podem determinar no Quadro 5.2.

QUADRO 5.2. Componentes C₁, C₂ e C₃ do Coeficiente C de McMath

Vegetação		Solo		Topografia	
Cobertura	C ₁	Textura	C ₂	Declividade	C ₃
100	0,08	Arenosa	0,08	0,0 - 0,2%	0,04
80 - 100%	0,12	Ligeira	0,12	0,2 - 0,5%	0,06
50 - 80%	0,16	Média	0,16	0,6 - 2,0%	0,08
20 - 50%	0,22	Fina	0,22	2,0 - 5,0%	0,10
0 - 20%	0,30	Argilosa	0,30	5,0 - 10%	0,15

Tempo de concentração. O tempo de concentração T_c é calculado pela equação de Kirpich.

$$T_c = L^{1,15} / 7700 H^{0,38}$$

onde T_c: tempo de concentração (horas)

L: comprimento (pés) do dreno principal à montante do ponto considerado

H: diferença de altura entre o ponto considerado no dreno principal e o divisor hidrológico.

A equação de McMath não é lineal portanto as descargas calculadas para ba cias parciais não podem ser somadas para obter a descarga da bacia total. Então pa ra cada bacia considerada é necessário repetir o cálculo do início.

O método racional e o método de McMath permitem o cálculo da descarga máxi ma de escoamento que deverá ser utilizado para o dimensionamento do dreno princi pal e das estruturas de saída e de controle. ‘

5.4. Capacidade de um sistema de drenagem superficial em solos cultivados

A capacidade do sistema de drenagem vai depender principalmente da quantii dade total de água que se requer drenar num período de tempo determinado.

Dependendo da cultura, a eliminação da água far-se-á em 24-48 horas e até uma semana. Isto depende dos meios econômicos e do tipo de culturas.

De acordo ao anterior podemos reconhecer 3 tipos de drenagem superficial:

Drenagem tipo A. É o mais intenso de todos e deve-se realizar em solos de grande valor agrícola, que estejam perto dos centros de consumo. Neste sistema tem-se as culturas mais valiosas e mais exigentes de drenagem. A água deve ser extraii da em um tempo menor que 24 horas.

Drenagem tipo B. Aquele que permite tirar a água em excesso em 24 a 48 hora s depois da inundação.

Drenagem tipo C. Sistema que leva mais de 48 horas para tirar a água em excesso do solo. Permite o desenvolvimento de culturas resistentes à umidade.

Coefficiente de drenagem. É a quantidade de água que se deve extrair de uma área num tempo determinado para permitir o bom desenvolvimento das culturas. A unii dade mais utilizada é m/dia, devido aos cálculos de espaçamento de drenos mediante equações.

No caso de drenagem superficial ao nível parcelar é mais recomendável usar a unidade l/seg/ha por constituir um módulo mais fácil de utilizar no dimensionamento dos coletores (canais).

Exemplo de cálculo do módulo de dimensionamento dos drenos superficiais no Projeto Mandacaru (Juazeiro, Ba).

Os antecedentes de precipitação da área demonstram que a intensidade máxii ma de chuva, numa análise de 5 anos, foi de 90 mm/4 horas.

A informação de infiltração nos grumossolos da área demonstra que o solo pode infiltrar uns 55% da água desta chuva. Isto indica que se tem uns 45% de escoamento superficial, ou seja, $90 \times 0,45 = 40$ mm.

Tendo em vista a natureza dos solos e as condições climáticas da região determinou-se a necessidade de uma drenagem de tipo B, ou seja tirar a água superficial em um período de 24 horas.

$$\text{Coeficiente de drenagem: } \frac{40 \text{ mm}}{24 \text{ horas}} = 4,6 \text{ l/seg/ha}$$

O coeficiente de drenagem é 4,6 l/seg/ha e constitui o módulo de dimensionamento dos drenos superficiais. Assim, se se tem parcelas de 15 ha, então a vazão do dreno coletor parcelar será de 69 l/seg.

O procedimento de cálculo para a secção transversal dos drenos é discutido em um capítulo especial.

6. ESTUDOS E PESQUISAS DE DRENAGEM*

6.1. Objetivos da pesquisa

O objetivo fundamental dos estudos e pesquisas de campo, envolve a necessidade de reconhecer o problema, como única forma de se dispor de elementos de julgamento suficientes para proceder ao diagnóstico do mesmo. Tais determinações realizam-se na maioria dos casos, para ensaiar tratamentos de recuperação dos solos já afetados pelo alto lençol freático e/ou a salinidade, numa área que pode abranger entre 20% a 80% do projeto; porém em outros casos podem ter como objetivo prognosticar a situação futura.

Este segundo caso se apresenta frequentemente nos novos projetos de irrigação, em climas áridos, onde a irrigação produz uma substancial modificação no balanço hídrico em equilíbrio com o clima, provocando a ascensão dos níveis como consequência do aumento da recarga. É comum observar-se em projetos novos, o aparecimento de problemas de drenagem em espaços tão curtos como 5 a 10 anos depois de iniciada a irrigação.

Uma baixa capacidade natural da drenagem, tende a criar problemas de excesso de umidade num futuro próximo, pode reconhecer-se se se dispõe de suficiente informação geológica, edáfica, hidrológica e climática. Isto permite adotar medidas quanto a diminuição da recarga e/ou aumento da capacidade de descarga, bem como a estudos e pesquisas prévias, no sentido de um melhor conhecimento da transmissibilidade dos estratos.

Segundo os estândares do Bureau of Reclamation (1964) em qualquer pesquisa sobre drenagem, o que se busca são os dados necessários para responder as seguintes questões:

1. Existe na atualidade ou há possibilidade de no futuro produzir-se um excesso d'água?
2. Existe uma saída adequada para eliminar o excesso d'água?
3. Qual é a fonte do excesso d'água?
4. Os solos podem ser adequadamente drenados?

* Tradução parcial do capítulo correspondente do Manual de Drenagem Agrícola do Dr. C. J. Grassi.

5. Que quantidade d'água deve ser removida?

6. Que sistema de drenagem dará melhores resultados?

Ainda que, os aspectos agrícolas, econômicos, sociais, legais e institucionais sejam importantes para compreender e resolver os problemas de drenagem em seu conjunto, orientaremos nossa análise aos estudos que têm relação principalmente com fatores físicos. Com este objetivo, discutiremos especialmente.

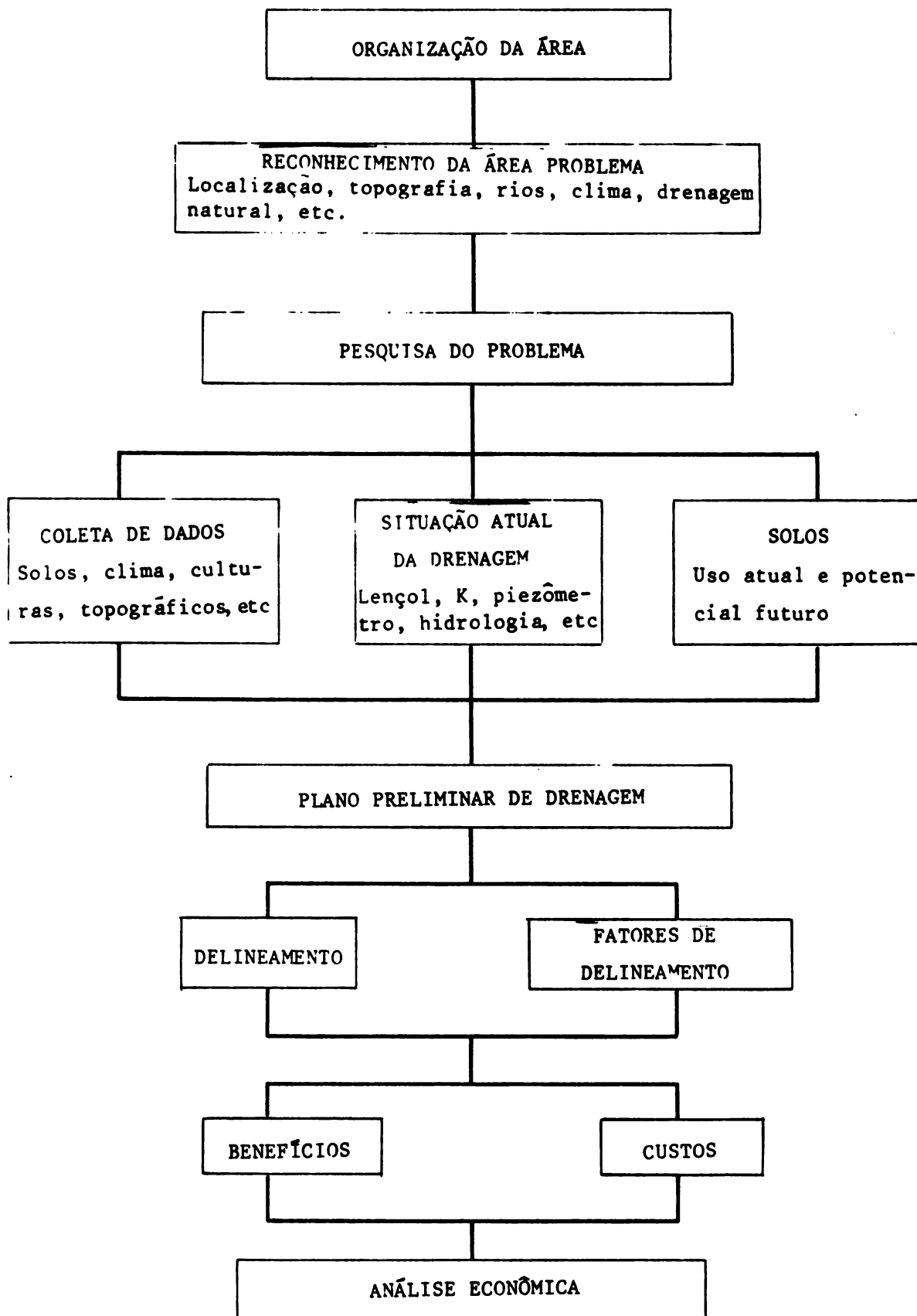
- a. Estudos topográficos
- b. Estudos do solo
- c. Estudos geológicos
- d. Estudos da salinidade
- e. Estudos dos níveis freáticos
- f. Estudos da permeabilidade
- g. Estudos dos níveis piezométricos

Os estudos e pesquisas podem, por sua vez, terem diferentes níveis segundo as exigências do projeto; reconhecimento, plano diretor, viabilidade e projeto executivo.

<u>ETAPAS</u>	<u>FINALIDADE</u>
Reconhecimento	Definir preliminarmente as áreas de possível aproveitamento e disponibilidade de recursos agrícolas e sócio-econômicos.
Plano Diretor	Definir em ordem de prioridade os planos para a programação dos estudos de viabilidade econômica.
Viabilidade do Projeto	Demonstrar a viabilidade econômica do projeto com o objetivo de captação de recursos e obtenção de financiamento.
Projeto Executivo	Detalhar todos os planos de trabalho para a execução das obras.

Em forma muito geral o esquema de trabalho seria como aquele apresentado no Organograma I.

ORGANOGRAMA I. Esquema de Trabalho para um Projeto de um Sistema de Drenagem.



A revisão dos dados disponíveis, consiste em coletar e analisar toda informação de fontes distintas: topografia, solo, geologia, hidrologia, clima, culturas, etc., direta ou indiretamente relacionada com o problema de drenagem; pois constitui uma informação valiosa para reconhecer de uma forma global o problema e decidir a coleção de dados adicionais.

Reconhecimento de campo

O reconhecimento de campo, permite a observação visual do problema e ajuda a planejar a sequência de estudos e pesquisas. Os estândares do Bureau of Reclamation (1964), enumera os seguintes pontos a serem esclarecidos no reconhecimento de campo:

1. Localização e capacidade das drenagens naturais
2. Localização e condições das saídas
3. Localização e características das fontes d'água: canais, poços, mananciais, lagoas, pântanos, etc.
4. Práticas de irrigação empregadas, tais como, métodos de aplicação, eficiência de irrigação, sistematização do terreno, etc.
5. Estimativa do nível da água subterrânea, e informação relacionada com a flutuação e direção do movimento
6. Padrão das culturas no presente, e tendência futura
7. Tipo, localização, espaçamento, profundidade e efetividade de drenos na área ou em áreas vizinhas
8. Marcas da altura de enchentes que possam ser usadas para avaliar seu efeito
9. Acidentes topográficos que poderiam afetar a localização dos drenos
10. Discussão com o pessoal radicado no projeto, em especial nas áreas cultivadas sob irrigação.

6.2. Estudos topográficos

Difícilmente é necessário realizar estudos topográficos com fins de drenagem em terras sob irrigação, já que, geralmente, planos e fotografias aéreas estão disponíveis em outras etapas do delineamento e construção da obra. Os mapas devem traduzir fielmente uma real representação da configuração superficial do terreno, e incluir todos os acidentes naturais de importancia, seja porque impedem ou retardam ou facilitam a drenagem natural.

A escala do mapa é função do nível do estudo, da área envolvida no mesmo e das declividades e acidentes topográficos relevantes. Para grandes áreas e estudos preliminares, é suficiente uma escala de 1:50.000. Para áreas menores e estudo de um grau maior de detalhe, escala de 1:25.000. Estudos especiais como de drenagem e proteção, podem requerer escala de 1:5.000.

Quanto à equidistância das curvas de nível, pode-se adotar entre 1 m e 1,50 m em áreas grandes, para estudos preliminares, e com considerável relevo. Para o traçado dos sistemas de drenagem geralmente é suficiente 0,50 m de equidistância, ainda que em terrenos planos, pode-se requerer entre 0,20 m e 0,25 m.

Os mapas devem incluir os canais naturais que são os potenciais coletores da drenagem e também o coletor da área, ainda quando este se encontre fora do projeto propriamente dito. Além disso o mapa deve conter a localização das principais estruturas hidráulicas: açude, represa de derivação, etc., e o traçado da rede geral de canais: matriz, principal, secundário, terciário.

O estudo topográfico compreende a obtenção de perfis longitudinais dos canais naturais: rios, arroios, dos possíveis coletores de drenagem e da rede geral de irrigação.

6.3. Estudo de solo

Mapas do solo

Os mapas de solo feitos com critérios edafológicos contêm informação valiosa, permitindo delimitar áreas com determinadas características de perfil, que definem os principais problemas da drenagem, tendo em conta que em dito estrato superficial é onde o excesso de água e/ou de salinidade afetará as culturas.

O edafólogo ao descrever um perfil e detalhar as características físicas de cada horizonte e em especial sua textura e estrutura, está fazendo uma avaliação dos problemas potenciais de drenagem, ao anotar com relação a determinado horizonte: "drenagem interna interrompida", ou "permeabilidade lenta". Além disso pode encontrar o lençol na profundidade do solo que envolve o relevo ou observar o efeito de um nível d'água flutuante, pela cor mosqueada (amarelo, vermelho ou azul) que dá lugar os processo de oxirredução.

A descrição dos perfis típicos se utiliza para classificar os solos do ponto de vista taxanômico em séries, tipos e fases. A série do solo fica defi-

nida pelas características do perfil de solo; o tipo pela textura do horizonte su perficial e a fase por alguma particularidade que tem importância no seu manejo , como declividade, erosão, pedregosidade, etc.

Não obstante, uma classificação técnica ou agrológica, pode conter critérios de avaliação mais específicos do ponto de vista de drenagem, tal como ocorre com a do Bureau of Reclamation (1963), na qual, as sub-classes se baseiam em três fatores limitantes: solo, topografia e drenagem. Em relação a limitações por drenagem, o procedimento inclui fatores auxiliares de avaliação, entre os quais estão "drenabilidade", qualificada numa escala de três categorias. Por exemplo: 3 sd/Z significa: classe 3 por limitações do solo (s) e drenagem (d) e pobre drenabilidade (Z).

Os relevos e mapas da classificação taxanômica e da classificação técnica ou agrológica, geralmente são disponíveis através de outras etapas dos estudos do projeto de irrigação e é aproveitável a valiosa informação que contêm. Não obstante, estes mapas apresentam limitações resultantes das profundidades reduzidas que abarcam, pois geralmente o relevo não se estende a mais de 1,50 m.

Profundidade do solo a pesquisar

Para resolver os problemas de drenagem pode ser de grande importância os estratos que ficam abaixo de 1,50 m, seja por que ali se encontram os que têm capacidade de transmitir água, seja porque se localiza a "barreira" limitante do fluxo gravitacional. As características do solo abaixo de 1,50 m são importantes para definir o tipo de fluxo até o dreno, horizontal ou radial e para calcular o espaçamento entre os mesmos.

Não obstante, este tipo de pesquisa do subsolo, está geralmente fora do alcance do equipamento que comumente emprega o edafólogo e cai no grupo de estudos específicos às pesquisas de drenagem. Os estâdares do Bureau of Reclamation (1964) estabelecem que, tentativamente, as profundidades dos poços nas pesquisas do solo podem distribuir-se da seguinte forma:

60% até 3 m

30% entre 9-12 m

10% até a "barreira"

Equipamento

Com respeito a este assunto, cabe esclarecer, que não existe um equipamento que se ajuste a todas as condições físicas do solo pelo que torna-se necessário o emprego de diferentes implementos. Na realidade se apresentam diferentes situações quanto a: 1) profundidade da exploração; 2) característica física dos estratos a atravessar; 3) grau de umidade do solo; 4) necessidade de obter-se amostras sem distorções.

Os equipamentos que comumente nos servimos para tais propósitos podem classificar-se como: 1) trados; 2) tubos; 3) injeção d'água a pressão. Alguns são operados manualmente, outros com motor. Uma interessante discussão dos distintos procedimentos foi realizada por Donnan (1957).

6.4. Estudos geológicos

Dado o interesse para drenagem das pesquisas dos estratos do subsolo até aproximadamente 10 m de profundidade a geologia e a geomorfologia representam uns valiosos auxiliares a se levar em conta.

Em primeiro lugar, a ação que deu origem ao material do solo: glacial, éolico, aluvial, etc., tem relação com sua textura e permeabilidade. A maior parte dos problemas de drenagem se apresentam em solos aluviais, onde os materiais depositados oscilam desde argila até cascalho grosso, com toda classe de combinações possíveis. Os mapas geológicos e a descrição dos perfis geológicos, constituem informação, que, se bem não seja específica dos estudos de drenagem, complementam os dados necessários para conhecer o problema.

Às vezes, os estratos transmissores de água, devem buscar-se a mais de 10 m de profundidade e chegar inclusive até a mais de 100 m. O emprego da drenagem por bombeamento, requer um conhecimento das camadas freáticas e artesianas, que, ao explorá-las produzem o abaixamento dos níveis da água subterrânea em toda a área. Em tal caso, a informação hidrogeológica que resulta dos poços existentes, ou os que possam perfurar-se como parte da pesquisa da drenagem ou água subterrânea, facilita a tomada de decisões com respeito ao método a aplicar.

A descrição do perfil do poço, que contém as características das camadas, assinalam se os estratos são confinados ou não confinados e o rendimento em função da depressão ao efetuar a prova de bombeamento. No caso de aquíferos confinados, a descrição das características dos distintos estratos, assinalam a possibi-

lidade de fluxos verticais ou não em resposta aos gradientes criados mediante o bombeamento. As agências governamentais, geralmente registram os poços perfurados e exigem a descrição do perfil, produção do poço e qualidade da água, por pessoal autorizado; acumulando, assim, informações de grande utilidade para fins das pesquisas de drenagem.

6.5. Uso atual da terra

Compreende o inventário da terra desde o ponto de vista de sua utilização atual e potencial bem como sua localização no mapa. Além disso, inclui o traçado das estradas, dos canais de irrigação e os limites de sub-divisão das propriedades.

As diversas formas do uso da terra em projetos de irrigação, podem classificar-se segundo o esquema abaixo:

I. Terras cultiváveis

- a. com irrigação
- b. sem irrigação

II. Terras não cultiváveis

- a. com vegetação
- b. desmontadas e niveladas

Em terras cultiváveis, deve-se esclarecer o tipo de cultura: estacional ou perene, e as espécies e variedades correspondentes. No caso de terras não cultiváveis, deve-se especificar as características da vegetação natural: pastagem, savanas, selva, etc.

A delimitação no plano dos diversos usos da terra contribue para o reconhecimento do problema de drenagem e relacioná-lo com as possíveis fontes de recarga, especialmente na área que compreende as terras sob irrigação e as culturas que requerem, por sua própria natureza, maior frequência de irrigação. É óbvio que as áreas mais intensivamente irrigadas são também auxiliadas por uma maior rede de coletores parcelares, que assim multiplicam as áreas de recarga.

Pelo contrário, as terras com vegetação natural, especialmente as do tipo freatófilo, constituem áreas de descarga e de abaixamento dos níveis freáticos, devido a que há um consumo significativo de água por evapotranspiração. Às vezes os níveis freáticos estão mais baixos nas áreas das terras sem cultivar e a vegetação que é então consequência do regime pluviométrico, esgota a água adicionada ao

solo pela chuva, contribuindo assim, a aliviar o problema, ao consumir a água que penetraria nos aquíferos subterrâneos.

Os mapas do uso atual da terra, geralmente são disponíveis por vias de outros estudos, ou podem ser confeccionados a partir de fotografias aéreas. Se não dispuzermos de fotografias ou estas não sejam recentes, o mapa pode ser o resultado de toda a compilação e união dos dados: 1) informação cartográfica disponível; 2) plano da rede de irrigação; 3) plano da rede viária; 4) plano cadastral das propriedades; 5) dados estatísticos sobre as culturas; 6) mapas da vegetação; 7) reconhecimento no campo.

6.6. Estudos de salinidade

Os estudos de salinidade compreendem o relevamento do campo e as determinações de laboratório, os quais, por sua vez, permitem reconhecer o grau de afetamento das terras pela salinidade. Baseado em um número reduzido de determinações, podem-se agrupar os solos sob o ponto de vista de sua salinidade, de conformidade aos seguintes padrões do U.S. Salinity Laboratory (1954), com base na condutividade elétrica do extrato saturado, a porcentagem de sódio trocável e o pH:

<u>Solo</u>	$CE. 10^3$ (mmhos/cm)	<u>P S I</u> (%)	<u>pH</u>
Normal	< 4	< 15	< 8,5
Salino	> 4	< 15	< 8,5
Sódico	< 4	> 15	> 8,5
Salino-sódico	> 4	> 15	< 8,5

A porcentagem de sódio trocável, PSI, pode-se estimar em função da relação de adsorção do sódio, R.A.S., utilizando as relações empíricas obtidas pelo U.S. Salinity Laboratory (1954), e a condutividade elétrica, $CE.10^3$, mede-se diretamente na ponte destinada para tal fim.

A delimitação no mapa dos grupos anteriormente estabelecidos, permite contar com um valioso auxiliar para diagnosticar a gravidade do problema, tal como é o mapa de salinidade, e inclusive formular um plano agrológico de recuperação dos solos, associado a drenagem.

Em solos salinos, a recuperação ou reabilitação apoia-se na lixiviação dos sais através de lavagem. Para isto, é necessário água em abundância e de boa

qualidade, uma permeabilidade satisfatória no solo e drenagem assegurada. Ensaio de campo em pequenas parcelas, permitem seguir o processo de lixiviação, ou seja, da diminuição do conteúdo salino em função da profundidade, pelo efeito do tratamento com lavagens de diferentes lâminas d'água. A relação entre a lâmina de lixiviação e a profundidade do solo a lavar, pode-se representar por uma equação do tipo obtida por Reeve (1957) para o Coachella Valley.

$$d_L/D = \frac{1}{5 (C_f/C_i)} + 0,15$$

onde d_L : lâmina de água requerida para lixiviação
D: profundidade do solo a lavar
 C_f : conteúdo médio inicial de sal no solo
 C_i : conteúdo médio final de sal no solo

No caso de solos sódicos, antes de se proceder à lavagem é necessário substituir o sódio por cálcio no complexo trocável do solo, mediante a adição de gesso; ou simplesmente mobilizar-lo com enxofre, caso o cálcio se encontre presente no solo. Num ou noutro caso, deve-se estimar a quantidade de emenda a agregar nas diferentes áreas. Mapas complementares de recuperação de solos salinos baseado na condutividade elétrica e lâmina de lixiviação, e mapas de recuperação de solos sódicos que contenham as necessidades de gesso e de lavagem, constituem valiosos auxiliares para diagnosticar o problema de drenagem. Em ambos os casos trata-se de sais diretamente presentes no solo, ou sub-produtos de reações químicas, que devem separar-se do solo em exploração.

6.7. Estudos de níveis freáticos e piezométricos

Os estudos da água do subsolo, na profundidade vizinha à capa das raízes, constitui o aspecto central para estabelecer a natureza e extensão dos problemas de drenagem. A metodologia e o equipamento variam segundo se trate de problemas de elevação do plano freático ou de pressão artesianas, em camadas confinadas: portanto, abordaremos o tema separadamente.

a. Relevamento de níveis freáticos

Para medir o nível do plano freático, podem-se empregar: 1) poços existentes para provisão de água; 2) superfícies livres de água; 3) poços de observação. Os dois primeiros fornecem informação parcial, ainda que o terceiro é o que se instala com fins específicos da pesquisa de drenagem.

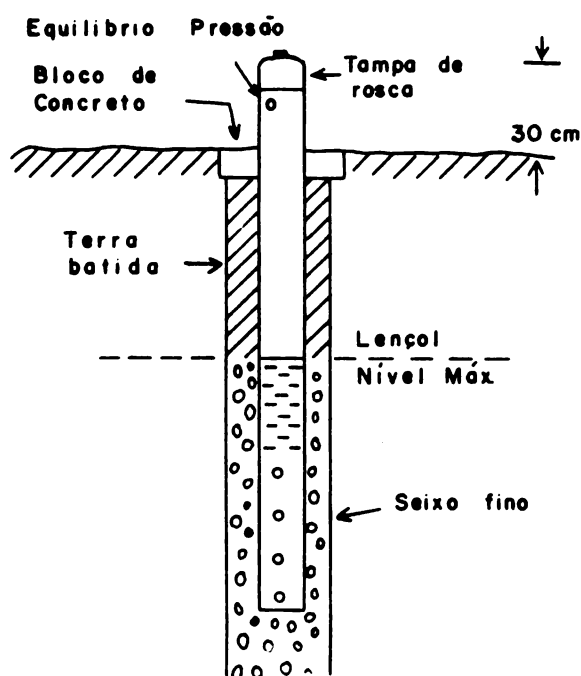
Os poços para provisão de água, escavados ou perfurados, permitem registrar o nível estático. A informação merece crédito quando é extraída de caudais reduzidos e/ou bebedouros. Os poços profundos para irrigação, onde se bombeia um caudal considerável, podem registrar um estado transitório do nível, ainda que não se encontrem em operação.

As superfícies livres de água: lagos, lagoas, pântanos, etc., fornecem informação de utilidade, se estão em conexão livre com a água subterrânea. Representam interesse de especial atenção porque podem, na realidade, constituir zonas de recarga ou descarga dos aquíferos.

Difícilmente, as informações obtidas pelos métodos anteriores, são suficientes para fins da pesquisa de drenagem, porque é tão escassa com relação à área total onde se requer pelo menos a inclusão de alguns perfis de poços de observação. Não obstante, se está unido a determinações geofísicas adicionais e à interpretação hidrogeológica, pode-se ter uma idéia bastante clara do problema.

Poço de observação

O poço de observação, consiste em um buraco aberto no solo, com o trado, até uma profundidade tal que cubra o nível mínimo esperado do plano freático. Em determinados solos, normalmente nos de fina textura, podem-se deixar sem revestir. Não obstante, para assegurar sua conservação e facilitar sua localização, é conveniente entubar um trecho superior a 0,50 m, aproximadamente, e estender o tubo 0,30 m por sobre a superfície do terreno.



Na generalidade dos casos, o poço de observação se instala por poucos anos, assim sendo, se requer determinado grau de crédito nas leituras e custo reduzido de operação e manutenção.

Um bom poço de observação se consegue com a instalação de um tubo, Figura 6.1, com diâmetro menor que o buraco e enchendo parcialmente o espaço vazio com seixo fino. Alcançado, com o trado, a profundidade proposta e assegurada a limpeza do buraco, coloca-se seixo fino no fundo, até uma altura de 10 cm. Instala-se o tubo, apoiando-o no seixo, completando-se também com seixo

o espaço anular entre o buraco e o tubo até próximo o nível esperado, perto da superfície, da água freática. Finalmente enche o buraco com terra calcada e fixa-se ao terreno com um bloco de concreto para evitar o roubo do mesmo.

Quanto aos materiais a empregar, cabe mencionar que o tubo pode ser de plástico, chapa galvanizada, ferro, asbesto-cimento, etc., ou seja, o material que economicamente seja o mais conveniente de acordo ao seu custo e condições de conservação. Convém, mesmo assim, perfurar os 0,50 m inferiores para evitar, que, ao entupir a base do tubo pela sedimentação, fique o poço fora de operação.

O diâmetro do tubo pode ser variável. Não obstante, deve-se levar em conta que à medida que o diâmetro aumenta, sua sensibilidade diminui, ocasionado pelo maior volume de água que deve entrar ou sair para permanecer em equilíbrio com o aquífero. Mesmo assim, em tubos de diâmetro reduzido, devem empregar-se métodos especiais de leitura. Um diâmetro de 5 cm em um poço de 10 cm de diâmetro parece ser uma medida ideal.

Quanto aos procedimentos para medir o nível freático, cabe assinalar que pode empregar-se uma cinta metálica com um dispositivo na parte inferior, que faz um som de uma forma característica ao alcançar o nível da água. Também se pode colocar um peso na parte inferior da cinta, pintando-a com giz no extremo inferior, a fim de reconhecer na mesma a altura de submersão. Devem-se evitar as varetas de madeira, porque devido ao seu diâmetro, quando submersas na água, modificam substancialmente seu nível. Outros métodos serão discutidos com relação à leitura dos piezômetros.

A limpeza do poço, é fator de capital importância, a fim de garantir boas leituras. Para isto, após concluída sua instalação, abaixa-se bruscamente o nível mediante a extração da água com uma bomba com válvula de pé, continuando-se a extração da água, até que esta sai limpa. Para comprovar se o poço é sensível, enche-se o tubo com água até nivelar com o extremo superior e anota-se a velocidade da descida do nível: uma descida lenta ou nula significa que o poço não trabalha; se pelo contrário, uma descida facilmente perceptível, mostra que está em operação. O mesmo teste pode-se realizar com certa frequência nos poços de uma rede e especialmente, quando entre duas leituras sucessivas, não se observa variação no nível.

Rede de poços de observação

O espaçamento entre os poços de observação e sua densidade, depende do nível do estudo e do grau de variação nos gradientes hidráulicos que se pretende

anotar. O relevo exterior do terreno pode dar uma idéia da possível mudança nos níveis freáticos, já que a configuração da superfície de água subterrânea, assemelha-se mais a do terreno que a um nível plano. Em camadas aluviais profundas de material grosso, pode-se aproximar a um plano, enquanto que em presença de um estrato relativamente impermeável próximo à superfície, a configuração assemelha-se ao do terreno.

Desta maneira, as características topográficas e do perfil geológico, os acidentes geográficos (rios, lagos, etc.) e as atividades do homem (canais, terras sob irrigação, etc., e grau de sub-divisão da propriedade); unidos à severidade do problema já evidenciado, podem orientar nossa decisão com respeito ao grau de densificação da rede e a possível localização das linhas de poços de observação. Por exemplo: pouco antes da mudança da declividade, dada sua influência no regime do movimento da água, ou onde existem claras evidências de uma troca na condutividade hidráulica dos estratos ou onde termina a área irrigada.

Em termos gerais, pode-se estabelecer que o espaçamento entre poços de observação pode oscilar entre 1/2 km e 2 km. Kessler (1966), inclui uma escala de densidade de pontos, baseada unicamente no tamanho da área:

<u>Área (ha)</u>	<u>Nº pontos</u>
100	20
1.000	40
10.000	100

A disposição dos poços num eixo de coordenadas, apresenta vantagens para o desenho e interpretação dos mapas e para representar perfis de níveis freáticos quadrimensionalmente. Entretanto, tem a desvantagem da inconveniência da localização de um número elevado de pontos, que ficam no centro de campos cultivados, onde é difícil localizá-los, além de dificultar os serviços mecanizados. Sem que seja preciso uma fiel regularidade geométrica, que possa conduzir à localização de poços em lugares inadequados ou que não interesse sob o ponto de vista do nosso estudo, é recomendável instalá-los de acordo a uma certa regularidade. Convém que sua localização seja relevante de acordo ao que pretendemos medir e que tenham facilidade de acesso, ao mesmo tempo em que possibilite o traçado de perfis longitudinais e transversais.

Os poços de uma rede geral, devem-se instalar de maneira que se possa obter uma representação média do nível freático em sua área de influência. Um poço

ço situado numa área de recarga muito localizada, não representa a situação média de uma fração do campo e seus dados não devem ser usados, senão para pesquisas especiais. Por exemplo, para se obter uma melhor representação do gradiente hidráulico, sobre uma linha normal ao canal, Figura 6.2, instalaram-se poços com espaçamento decrescente à medida que nos aproximamos do mesmo. A título de demonstração, as distâncias dos poços a partir do canal, poderiam ser: 0 m, 50 m, 100 m, 250 m, 500 m.

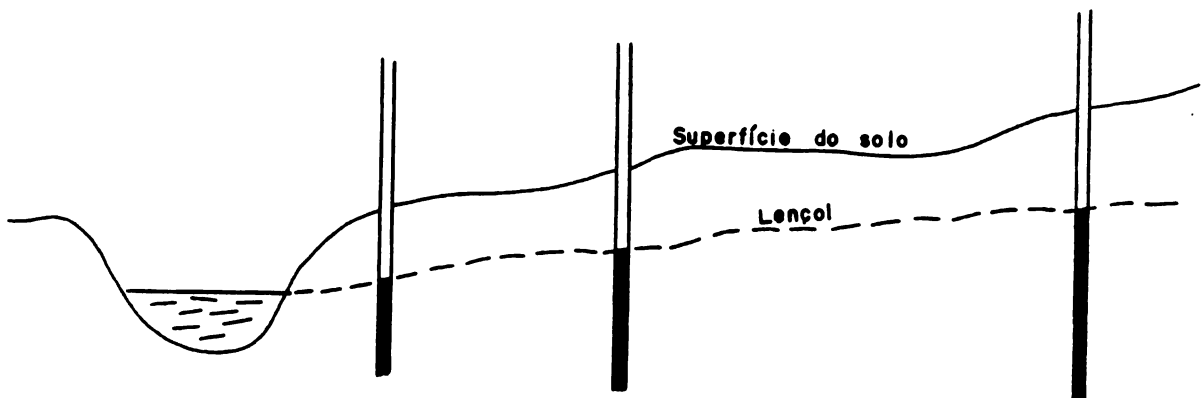


Figura 6.2

Registros

Cada poço deve estar registrado com toda a informação necessária que o individualize. Tal registro deve incluir, sua localização e elevação: cota da cabeça do tubo e do nível do terreno, detalhes relativos à sua construção: diâmetro do poço e do tubo, materiais, encascalhamento e perfuração do filtro, etc., características do perfil do solo: espessura e textura dos distintos estratos no perfil.

A frequência das leituras depende do grau de mudança nos níveis que se deseja registrar e da própria natureza do estudo. O registro dos níveis, antes, durante, e depois do período de recarga dos aquíferos (chuva ou irrigação), dá, sem

dúvida, valiosa informação para diagnosticar o problema, especialmente se dele nos resultam os níveis máximos e mínimos. Não obstante, para fins de delineamento necessita-se geralmente de um maior número de leituras: uma mensalmente e em certas ocasiões duas, durante o período de cume nos níveis máximos.

As pesquisas especiais, destinadas a determinar possíveis fontes de recarga e a magnitude das mesmas, podem requerer leituras mais frequentes; diários, inclusive registros linimétricos continuados, durante um breve período, que poderia ser no intervalo de uma e outra subministração: 10 ou 15 dias, para estudar o efeito da aplicação de uma irrigação, com uma lâmina definida.

Para registrar os poços, é necessário estabelecer um sistema de numeração prático, que contribua ao mesmo tempo para sua fácil localização no campo. Uma forma pode ser simplesmente a partir de um sistema de coordenadas retangulares, assinalando letras sobre o eixo X: A, B, C.....Z, e números 1, 2, 3,, sobre o eixo Y. No possível convém que o eixo Y coincida com o limite W-E ao sul da área e o limite N-S com o eixo Y ao oeste. A área em estudo ficaria assim integralmente no primeiro quadrante e cada poço se marca com uma letra e um número; por exemplo, D-4. O método de numeração incluído nos padrões do Bureau of Reclamation (1964), baseia-se no mesmo critério; já que os eixos são diretamente N-S e W-E e o ponto se situa com as distâncias ao E e ao N, a partir da origem do sistema. Por exemplo, 5E - 2N, significa um poço que se encontra a 5 km ao E e a 2 km ao N da intersecção dos eixos, ou seja, 5,4 km de distância em diagonal.

b. Relevamento de níveis piezométricos

Para determinar a existência de pressões variáveis com a profundidade do aquífero e gradientes verticais, que originam um fluxo ascendente ou descendente, empregam-se os piezômetros. Um piezômetro é um tubo de diâmetro reduzido cuja superfície exterior está em íntimo contato com o solo e no qual a única abertura está no extremo inferior. Desta maneira, a elevação da água no tubo mede a pressão com relação ao extremo inferior do mesmo. Dois ou mais piezômetros colocados em diferentes profundidades, constituem uma bateria de piezômetros.

Se empregam como piezômetros tubos metálicos de reduzido diâmetro, 3/8" (9,6 mm) a 1/2" (12,5 mm) a fim de que requeira um mínimo esforço para enterrá-lo a profundidades que podem superar os 10 m, e ao mesmo tempo disponha de um procedimento sensível a medida. Para sua instalação empregam-se dois procedimentos: 1) a golpes (martelo); 2) injeção de água sob pressão.

Martelo para instalar piezômetro

Para enterrar piezômetros a golpes, emprega-se uma ferramenta especial, que consiste em um martelo, segundo desenho de Christiansen (1943). É composto por um tubo metálico central, recheiado de chumbo para dar-lhe um peso de 8 a 10 kg, no qual se acopla dois tubos de 1" de 0,30 e 1,20 m, respectivamente.

Os tubos a serem utilizados como piezômetros cortam-se em pedaços de 2 m aproximadamente, rosqueando-o para assegurar seu acoplamento por meio de juntas. O primeiro pedaço a enterrar, protege-se em seu extremo inferior da entrada da terra, colocando-lhe um parafuso, cuja cabeça tem o mesmo diâmetro que o tubo, ou uma esfera metálica ou de vidro, de diâmetro levemente inferior ao do interior do tubo. Além disso, protege-se o extremo superior ou cabeça dos golpes do martelo, mediante outro parafuso de aço, que atua como cabeça impulsora, ou simplesmente por meio de uma junta das que se usam para os acoplamentos de secções.

Inicia-se a operação colocando-se o piezômetro no interior da parte maior e uma vez que o implemento está em posição vertical, levanta-se sucessivamente a uma altura de 50 cm e deixa-se cair. O impacto faz penetrar o tubo no solo e a velocidade de penetração depende da natureza física dos estratos. Enterrado o primeiro pedaço, acopla-se o segundo, procedendo-se assim, até alcançar a profundidade desejada. Então, com uma vareta metálica de pequeno diâmetro, 4 a 6 mm, composta de pedaços acopláveis, se empurra a esfera ou parafuso inferior, para assegurar a entrada d'água. Uma alternativa, pode consistir em levantar o piezômetro levemente, mediante duas chaves.

Limpeza do piezômetro

A operação seguinte consiste no desenvolvimento de uma pequena câmara de 10 cm de comprimento a partir do extremo inferior do tubo, e na limpeza da mesma. Para isto, aplica-se água sob pressão através de um tubo plástico de uns 6 mm de diâmetro, unindo-lhe no extremo inferior, um pedaço de tubo de bronze de uns 20 cm, do mesmo diâmetro. A pressão é obtida com uma bomba que se emprega na agricultura para pulverizamento de defensivos. Colocado o tubo plástico até o extremo inferior do piezômetro, marca-se um trecho de 10 cm a partir do lugar onde sobrepõe a cabeça do piezômetro. Começa-se logo a aplicação de água limpa sob pressão, movendo alternadamente o tubo de plástico para cima e para baixo, a fim de evitar a remoção da terra. Origina-se assim um fluxo de água através do espaço anular compreendido entre o piezômetro e o tubo de plástico que leva o material em sus-

pensão à superfície.

Quando a câmara aumenta em uma extensão de uns 10 m, movimentam-se também o tubo plástico a igual distância e continua aplicando água limpa até que o líquido que derrama pela cabeça do piezômetro saia completamente claro. Imediatamente enche-se o piezômetro com água, até igualar com o bordo superior e observa-se a velocidade da queda de nível como uma forma de comprovar se o mesmo está ou não em operação.

O procedimento para colocar piezômetros a golpes de martelo, requer um equipamento simples e em determinados tipos de solo, pode-se chegar a profundidades de até 10 m. Quando se alcança estratos de cascalhos grossos e pedra, o esforço a realizar é grande o que causa o entortamento do tubo não havendo, portanto, possibilidades de empregar este procedimento.

Instalação de piezômetros mediante água sob pressão

O método de fincar piezômetros com base à aplicação de água sob pressão, consiste em unir por intermédio de uma mangueira o extremo superior do tubo a uma bomba que aplica água com 100 a 300 libras/polegada² de pressão. Colocado o piezômetro, verticalmente, põe-se em funcionamento a bomba ligada a uma fonte de abastecimento de água e esta ao sair sob pressão pelo extremo inferior, remove o material. Este sobe à superfície, suspenso no caudal de água que circula pelo espaço situado entre o buraco que se vai formando no solo e o tubo do piezômetro. Movimentos de subidas e descidas com o tubo, ativam o efeito de remoção do material.

Uma vantagem deste procedimento é que permite alcançar maiores profundidades (até 30 m) que o método anterior e atravessar estratos que com o uso do martelo não é possível. Além disso, como remove o material e o leva à superfície, é possível fazer uma descrição, embora grosseira, da sua granulometria. A desvantagem está no equipamento que é mais complicado mecanicamente, custoso e trabalha com abundância d'água, o que pode tornar-se em limitante em alguns casos. Além disso, deixa um espaço anular entre o buraco e o tubo, que, se não tomar precauções para enchê-lo, anula sua função como piezômetro transformando-se em um simples poço de observação. Uma modalidade de evitar este inconveniente, consiste em parar bruscamente o equipamento uma vez alcançada a profundidade correspondente, a fim de provocar a sedimentação do material em suspensão e assegurar um maior controle

entre o solo e a superfície externa do tubo.

Medida dos níveis

A medida dos níveis d'água no piezômetro, propõe um problema especial, devido ao reduzido diâmetro do tubo. Dois procedimentos, são os mais comumente empregados: 1) insuflando ar através de um tubo de plástico: 2) mediante um circuito elétrico fechado.

No primeiro caso, emprega-se um tubo de plástico de uns 6 mm de diâmetro, abaixa-se um dos extremos lentamente pelo interior do piezômetro, ao mesmo tempo em que do outro (extremo) insufla-se ar pela boca. Ao alcançar o nível da água, percebe-se um zumbido de borburejo facilmente identificável. A distância na qual se encontra a água da cabeça do piezômetro mede-se diretamente no tubo de plástico.

O segundo procedimento consiste em uma sonda elétrica. A energia proveniente de uma bateria, e o contato com a água se evidencia pelo fechamento do circuito elétrico, que é acusado no medidor. Em alguns casos o extremo inferior da sonda tem os dois eletrodos: em outros, um eletrodo está num extremo e o outro diretamente no tubo metálico.

O tubo empregado no primeiro procedimento da leitura, é de menor custo, de fácil operação e suficientemente preciso. A profundidade em que é feita a medição pode ocasionar uma restrição, já que, quando os níveis estão muito baixos, não é perceptível o zumbido de borburejo, característico. Em troca, a sonda elétrica requer uma inversão maior, mas é muito precisa e opera eficientemente em diferentes profundidades do nível da água.

7. DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA NO CAMPO

Do ponto de vista de drenagem os dados de condutividade hidráulica são muito importantes para o cálculo do espaçamento de drenos e delineamento do sistema mais adequado.

Existem métodos de laboratório para sua determinação, mas, os dados obtidos no campo são de maior utilidade.

A seguir apresenta-se a descrição e uso de dois métodos para determinar a condutividade hidráulica no campo.

7.1. Método do trado

O princípio geral é simples: mediante um trado abre-se um poço com profundidade maior que o lençol freático do solo e tão logo seja alcançado o equilíbrio d'água, extrai-se uma parte desta e cronometra-se o tempo que demora em subir de um ponto a outro.

Mediante este método obtêm-se uma média da condutividade hidráulica do solo num raio de 40 a 50 cm, em torno do poço e abaixo do lençol freático.

Seu uso fica limitado a solos onde existe um lençol freático próximo à superfície e onde se possa manter a forma do poço ao término de toda a experiência. Em solos arenosos será necessário recorrer a um filtro com a finalidade de manter a forma original.

Durante a determinação da condutividade hidráulica, distinguem-se quatro fases principais:

- A. Perfuração do poço
 - B. Extração da água
 - C. Medidas de recuperação do lençol freático
 - D. Determinação da condutividade hidráulica a partir dos dados obtidos.
- A. Perfuração do poço

Esta deverá ser feita com a mínima alteração possível do solo. A profundidade da perfuração, dependerá da natureza, espessura, disposição dos horizontes e da localização do lençol freático. Em solos de perfil homogêneo e condutividade hidráulica baixa (argilosos), uma profundidade (H) adequada será de 60 a 70 cm abaixo do nível freático e quando se trata de solos com condutividade hidráulica

muito alta (arenoso) esta poderá ser da ordem de 30 a 50 cm. (Figura 7.1).

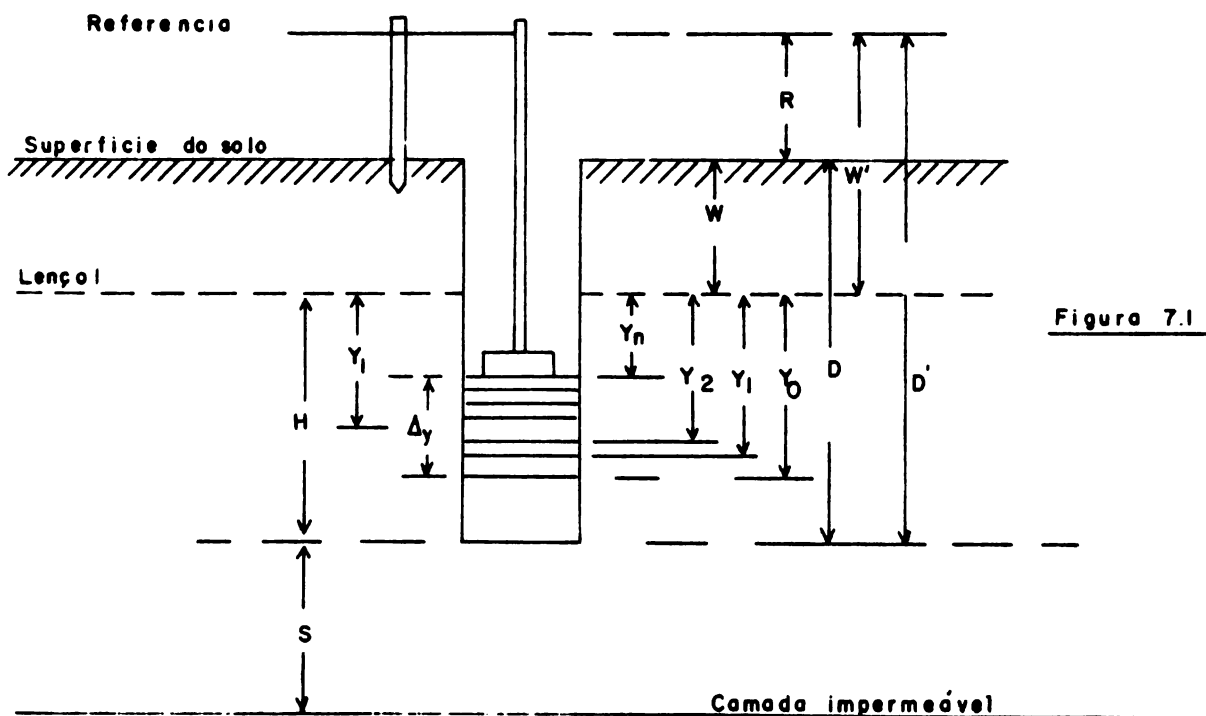


Figura 7.1

Se se deseja obter a condutividade hidráulica mediante este método, em solos constituídos de duas camadas de distintas condutividades, e se se pretende calcular o espaçamento dos drenos com base em fórmulas que considerem a condutividade acima e abaixo dos drenos, será necessário trabalhar com dois poços situados em diferentes profundidades. Estas profundidades ficarão determinadas através de um estudo prévio do perfil do solo.

Apesar de que a coluna do solo empregada na determinação da condutividade hidráulica com este método, seja muito mais larga que uma amostra não alterada para determinação em laboratório (aproximadamente 1000 a 1400:1), recomenda-se realizar pelo menos um teste por hectare devido as diferenças de condutividade de um ponto a outro no mesmo solo (Beers, 1963).

A perfuração deve ser feita mediante um trado agrológico ou com outro tipo mais apropriado para trabalhar em condições de solos saturados.

B. Extração da água do poço

Esta operação deve ser feita tão logo se estabilize o nível freático do

solo.

A filtração da água até o poço permitirá que se abram novamente todos os poros do solo que ficaram obstruídos pelo uso do trado.

A forma mais prática de extrair a água é mediante uma bomba manual. Por exemplo, um pedaço de cano com 50 - 60 cm de comprimento, com o diâmetro inferior ao do poço e com uma válvula de pé em um dos seus extremos. Na Figura 7.2 mostra-se o desenho de uma bomba simples construída com material disponível no mercado brasileiro.

C. Medidas de recuperação do nível freático

Intervalo e faixa. A medida da condutividade hidráulica é dada pela velocidade com que a água se recupera dentro do poço. Assim sendo, se poderá manter o tempo constante e a elevação variável, ou vice-versa. Não obstante, pela simplicidade que representa, geralmente se prefere manter o tempo constante (que poderá ser de 5, 10, 15, 30 segundos) dependendo do critério do operador para julgar a velocidade de elevação da água dentro do poço.

Não é recomendável continuar as medições por longo tempo já que à medida que diminui o valor de y_n (Figura 7.1), diminui também a velocidade de elevação da água. Isto significa que a relação $\Delta y/\Delta t$ deverá ser tomada dentro do primeiro quarto de recuperação do nível da água, ou seja, quando 25% da água extraída tenha voltado a fluir para dentro do poço (Beers, 1963). Em outras palavras, as medidas deverão ser tomadas antes que:

$$y_n < 3/4 y_0$$

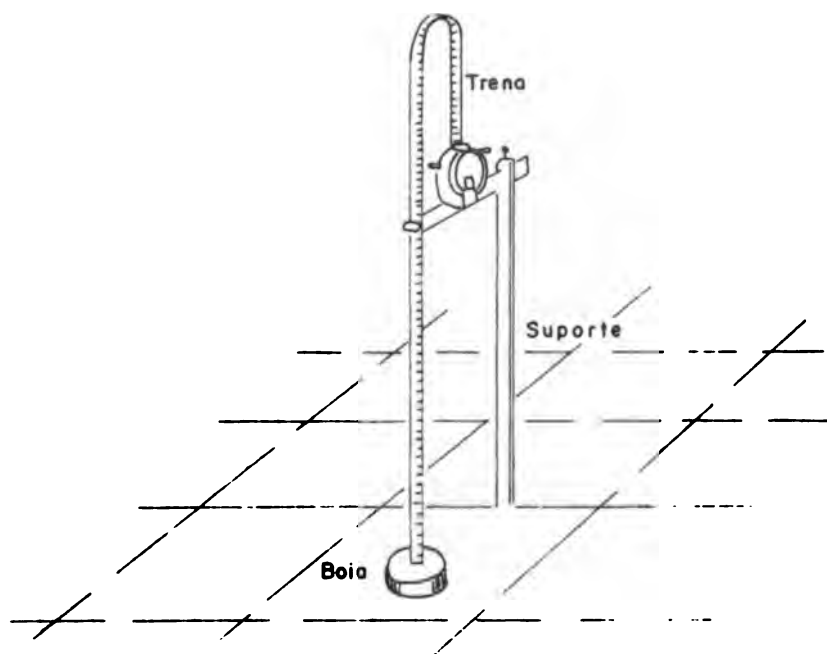
ou antes que:

$$\Delta y > 1/4 y_0$$

Por exemplo: Se $y_0 = 40$ cm, devemos fazer a leitura, no máximo, até que $y_n = 30$ cm, que dá uma margem de 10 cm entre a leitura inicial e final do teste.

Equipamento e procedimento de medição

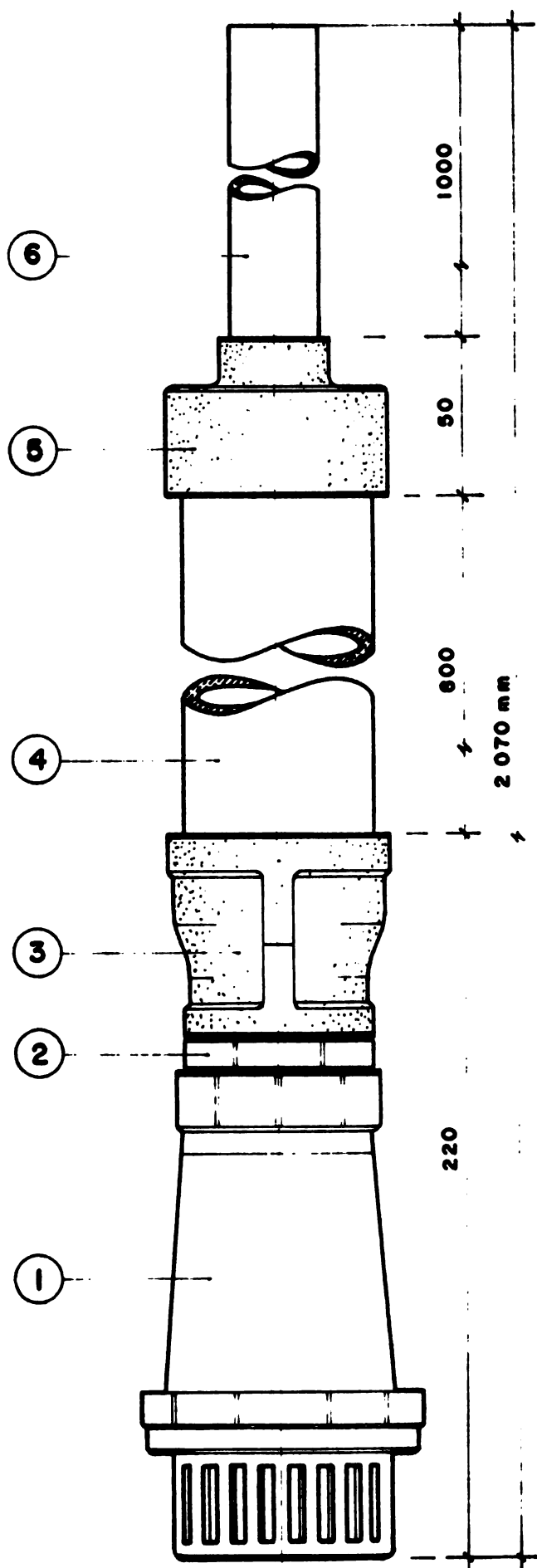
O equipo mais simples e adequado consiste numa trena metálica com uma bôia em seu extremo, a qual se coloca no braço de um suporte metálico. O suporte é fincado no solo e seu braço serve como ponto de referencia em todas as medidas (vide esquema).



O procedimento para as leituras é o seguinte:

- a. O suporte se coloca perto do poço de maneira que a bôia e a trena fiquem exatamente no centro dele.
- b. Logo que se alcança o equilíbrio no lençol freático, coloca-se a bôia na superfície da água. A distância entre a superfície da água e o braço do suporte (W' na Figura 7.1) anota-se no Registro I.
- c. Tira-se a bôia do interior do poço e gira-se o braço do suporte de sua posição.
- d. Mediante a bomba (Figura 7.2), extrai-se água do poço até a profundidade que corresponda (depende do solo).
- e. Logo depois, e tão rápido como seja possível coloca-se a bôia na superfície da água. O dado assim obtido corresponde à primeira leitura Y_0 .
- f. Logo fazem-se tantas leituras como seja possível a intervalos regulares de tempo. Durante o tempo de recuperação do nível do lençol freático deve evitar-se que a bôia fique colada às paredes do poço.
- g. Todas as leituras, incluindo as do lençol freático e profundidade do poço, deverão ser tomadas em relação ao braço do suporte, o qual ser-

Figura 7.2. Bomba para extração de água dos poços.



- ① VÁLVULA DE PÉ "TIGRE" (mot. plástico)
- ② CONEXÃO PLÁSTICA 1 1/2" Ø
- ③ LUIVA DE REDUÇÃO (metal) 2" p/1 1/2" Ø
- ④ TUBO PVC 2" Ø
- ⑤ LUIVA DE REDUÇÃO (metal) 2" p/7/8"
- ⑥ TUBO PVC 7/8"

OBS:

Todos os materiais existem no mercado nacional.

ve como ponto de referencia (vide Registro I).

D. Determinação da condutividade hidráulica

Nas páginas seguintes, apresentam-se as modalidades existentes para o cálculo da condutividade hidráulica seja com base em nomogramas, seja por fórmulas.

NOMOGRAMAS

Logo obtidos os valores de Δy , Δt , t e y no terreno, mediante nomogramas é possível o cálculo da condutividade hidráulica. Estes nomogramas foram preparados por Ernst (1950) e foram construídos para dois raios diferentes do poço ($r = 4$ cm e $r = 5$ cm), e para duas situações, também diferentes, do fundo do poço em relação à camada impermeável ($S = 0$ e $S > 0,5H$). Dependendo da situação do terreno, escolher-se-á o nomograma correspondente.

A relação entre a condutividade hidráulica e a velocidade de recuperação da água, pode-se expressar assim:

$$K = C \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad 7.1$$

Onde C é, por sua vez, função de y , H , r e S , cuja relação pode obter-se nos Nomogramas I, II, III ou IV, segundo lhe corresponda.

Nomograma I ($r = 4$, $S > 0,5H$) e Nomograma II ($r = 4$, $S = 0$)

Quando a distância do fundo do poço até o estrato impermeável é muito grande ($S = \infty$), deve-se empregar o gráfico que indica $S > 0,5H$, já que os valores obtidos são os mesmos.

Se $S < 0,5H$, não existe nomograma nem equação apropriada. Portanto, nestes casos estima-se que o valor de K esteja entre $S = 0$ e $S > 0,5 H$.

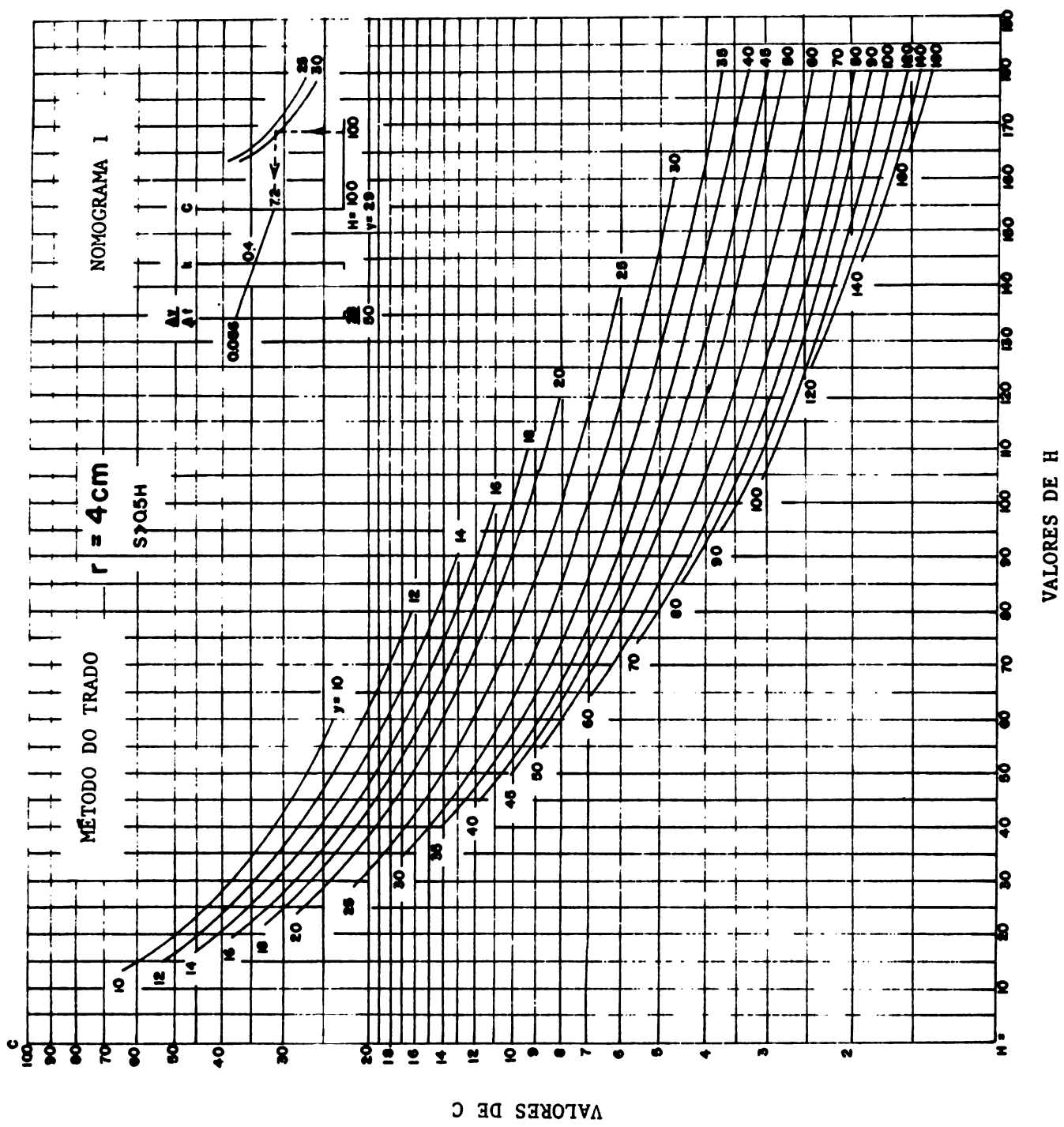
Em geral, pode-se dizer que os horizontes situados a mais de 10-15 cm do fundo do poço, têm escassa influência sobre a velocidade de recuperação da água, de tal sorte que podem-se utilizar perfeitamente o nomograma I neste caso.

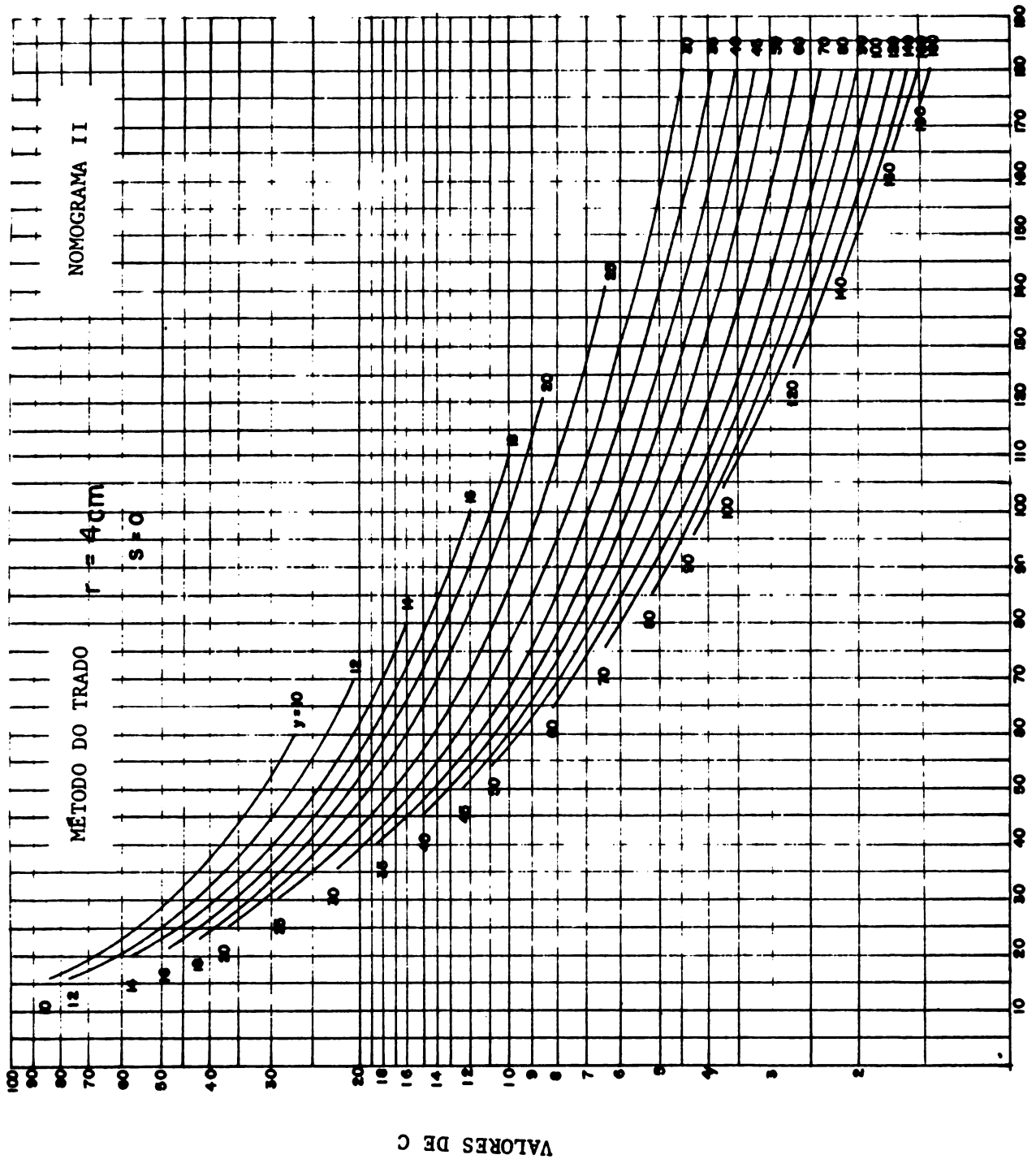
Nomograma III ($r = 5$; $S > 0,5H$) e Nomograma IV ($r = 5$; $S = 0$)

Estes nomogramas têm as mesmas características e limitantes que as indicadas para os anteriores.

Nomograma V ($S > 0,5H$) e Nomograma VI ($S = 0$)

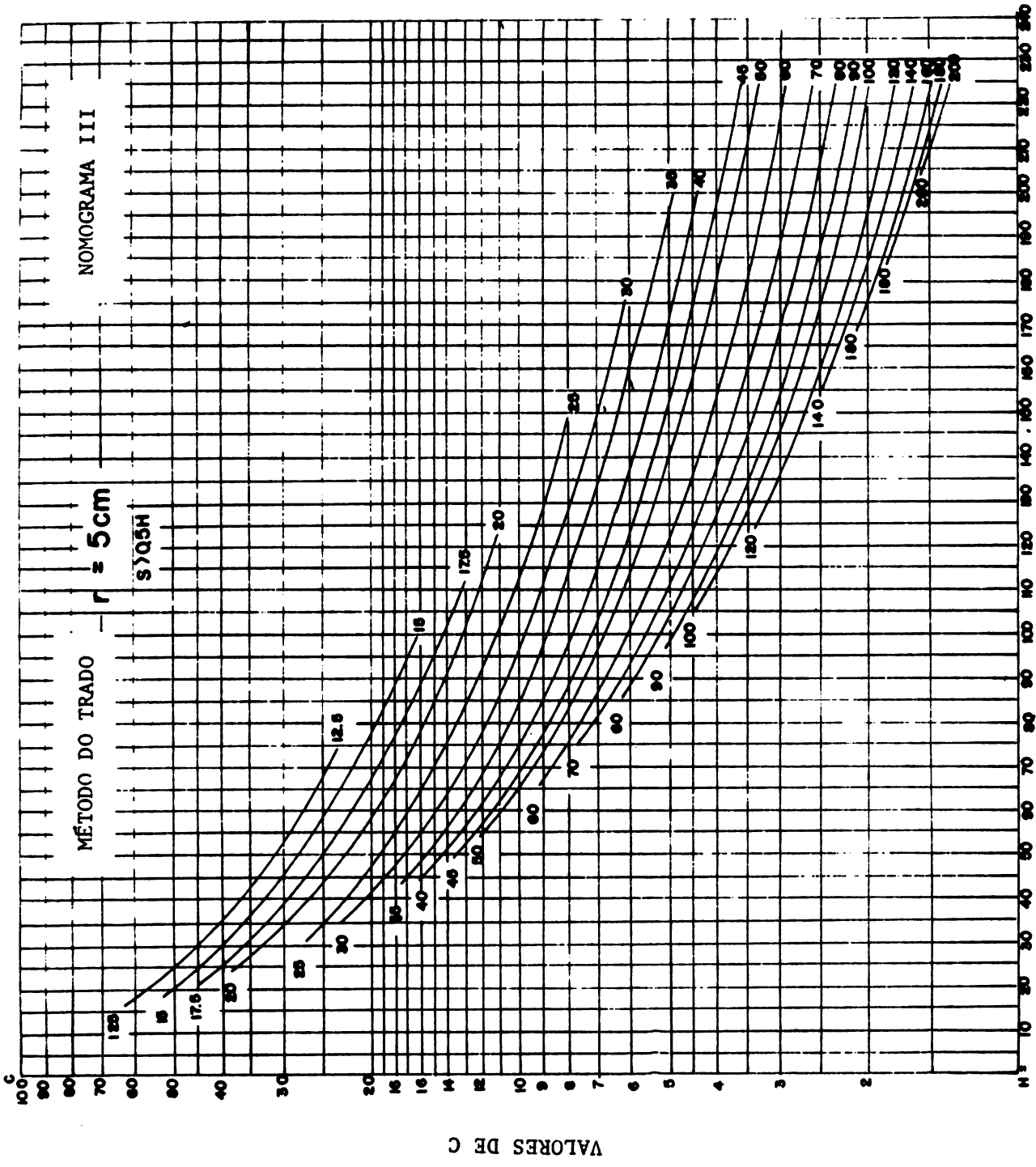
Em parágrafos anteriores indicou-se que é possível o emprego do método

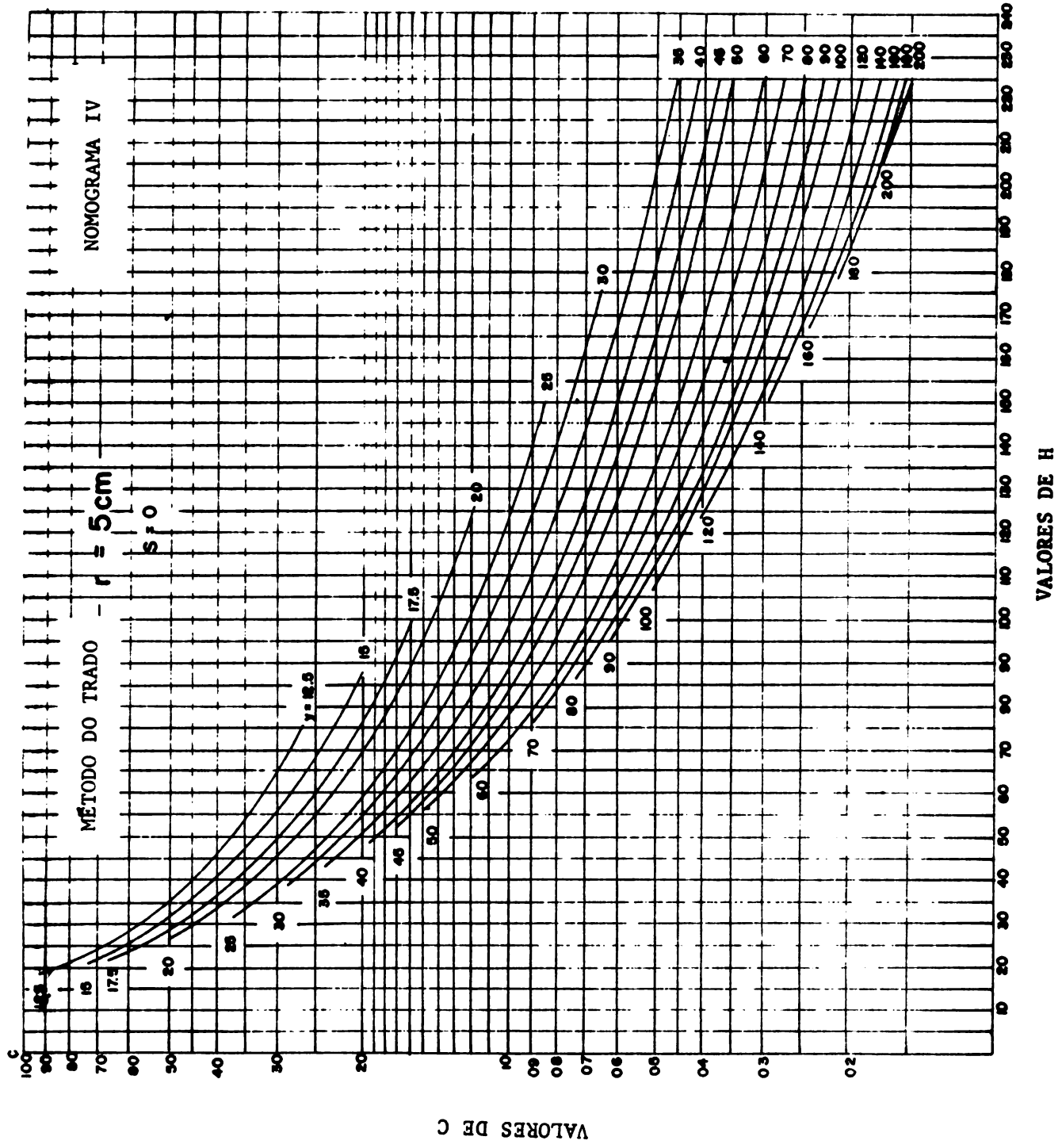




VALORES DE H

VALORES DE C







do trado para a determinação da condutividade hidráulica a grandes profundidades.

Com este propósito, Ernst construiu os nomogramas V e VI, nos quais a condutividade hidráulica está dada em função de y/r de H/r , obtendo-se C das curvas que aí se encontram.

Em geral, a maneira de usar os nomogramas I a IV é a seguinte: C se obtêm como uma função de H e y . Na abcissa, encontra-se H expressada em centímetros, e com o valor achado para y se obtêm C na ordenada. Como a relação $\Delta y/\Delta t$, é conhecida, então se multiplica por C , para calcular K (m/dia)

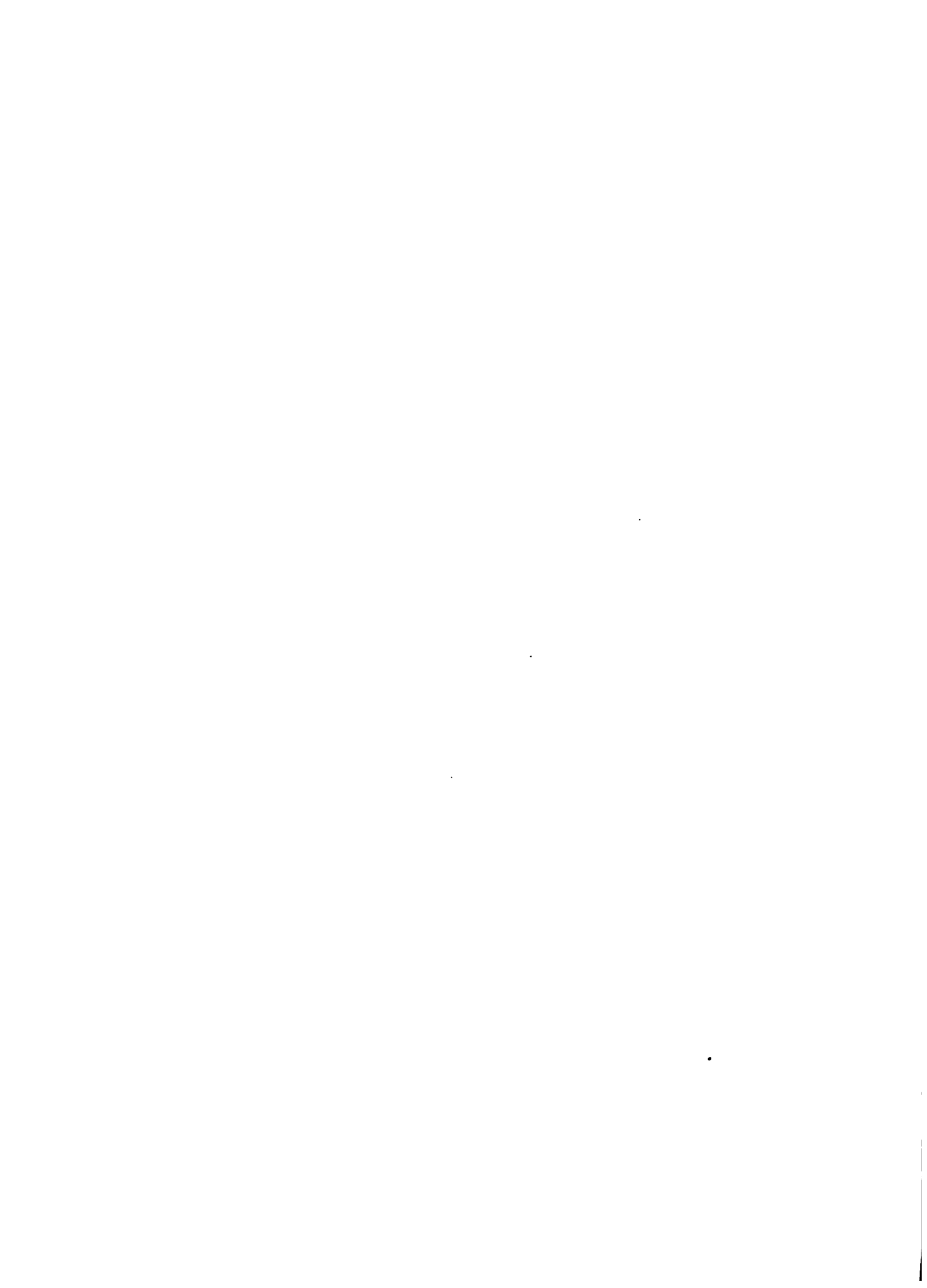
O exemplo seguinte ilustra o emprego de tais nomogramas.

Exemplo 1: Obtenção do fator K (condutividade hidráulica) a partir dos seguintes dados obtidos no terreno (vide Figura 7.1).

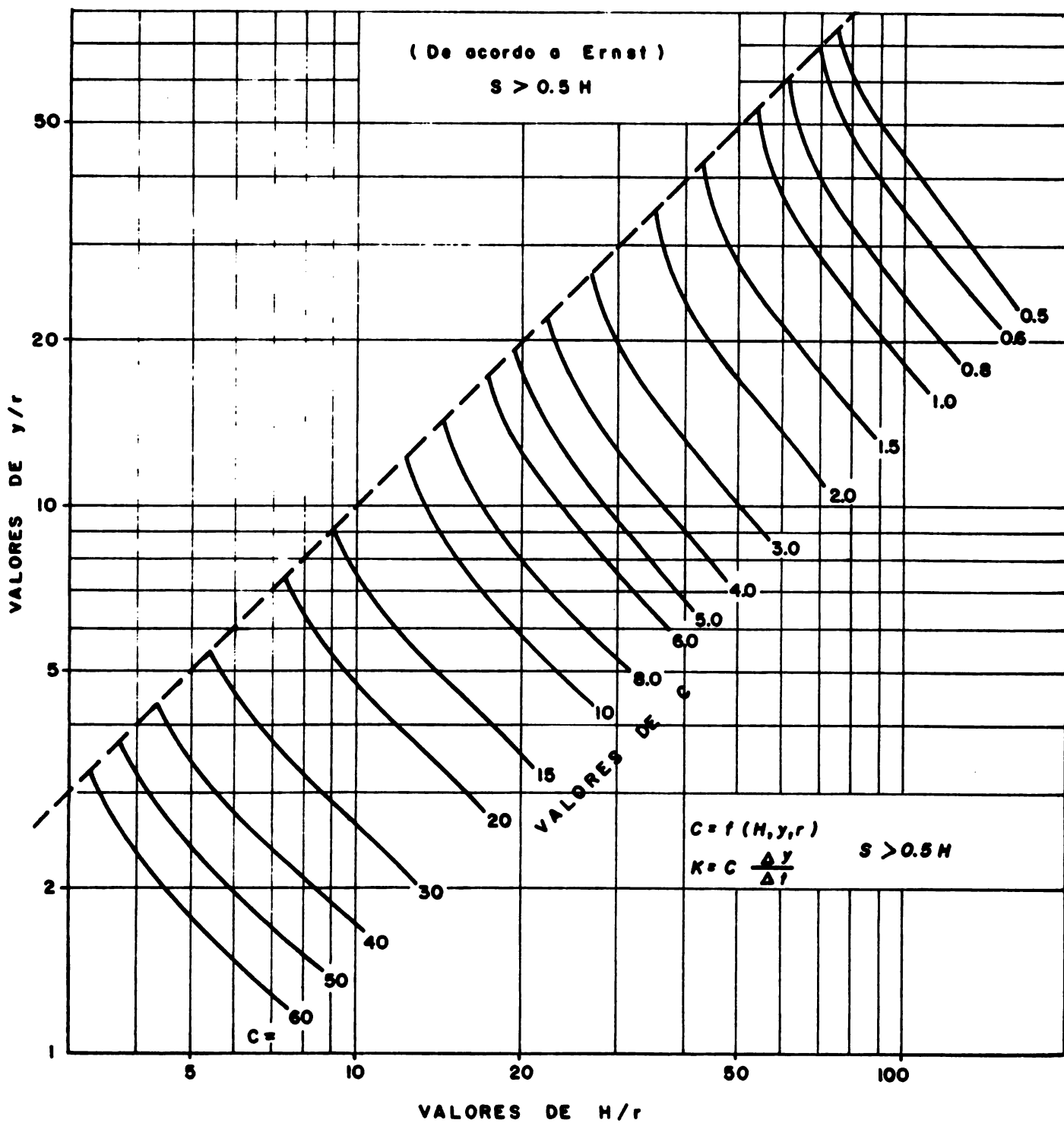
Dados

D'	=	240	D	=	200	Ref. sobre o solo	=	40 cm
W'	=	114	W	=	74	$S >$		0,5 H
H	=	126	0,5 H	=	63	r	=	4 cm

t	y'_t	Δy_t	Cálculos
0	145,2		$y_o = y'_o - W' = 145,2 - 114 = 31,2$
10	144,0	1,2	$\Delta y = y_o - y_n = \Sigma \Delta y_t = 5,6$
20	142,8	1,1	$y = y_o - 1/2 \Delta y = 31,2 - 2,8 = 28,4$
30	141,7	1,1	$H = 126$
40	140,6	1,0	$\rightarrow C = 6,0$ (Nomograma I)
50	139,6		$y = 28,4$
			$\frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{5,6}{50} = 0,112$
			$K = C \frac{\Delta y}{\Delta t} = 6,0 \times 0,112 = 0,67 \text{ m/dia}$

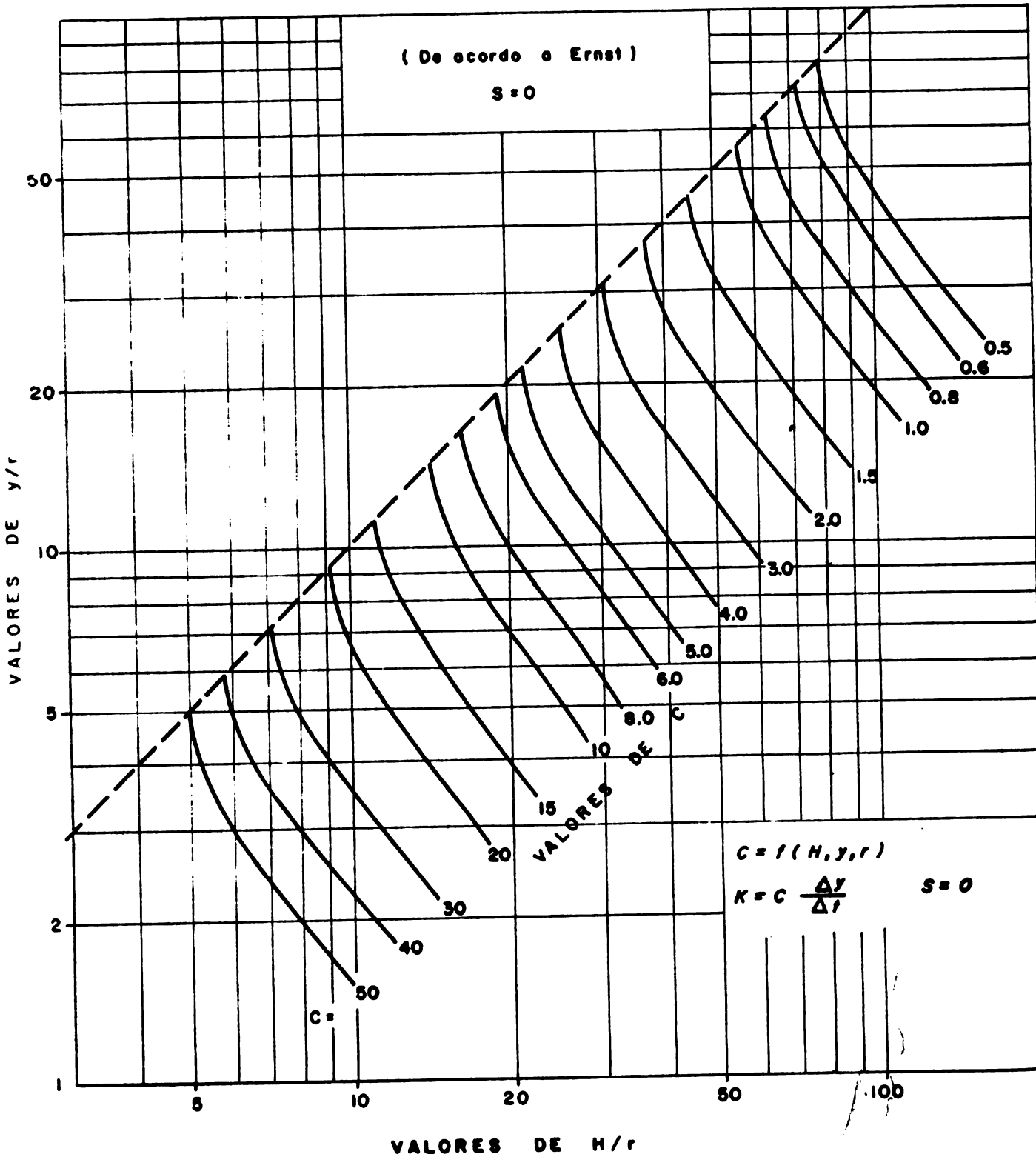


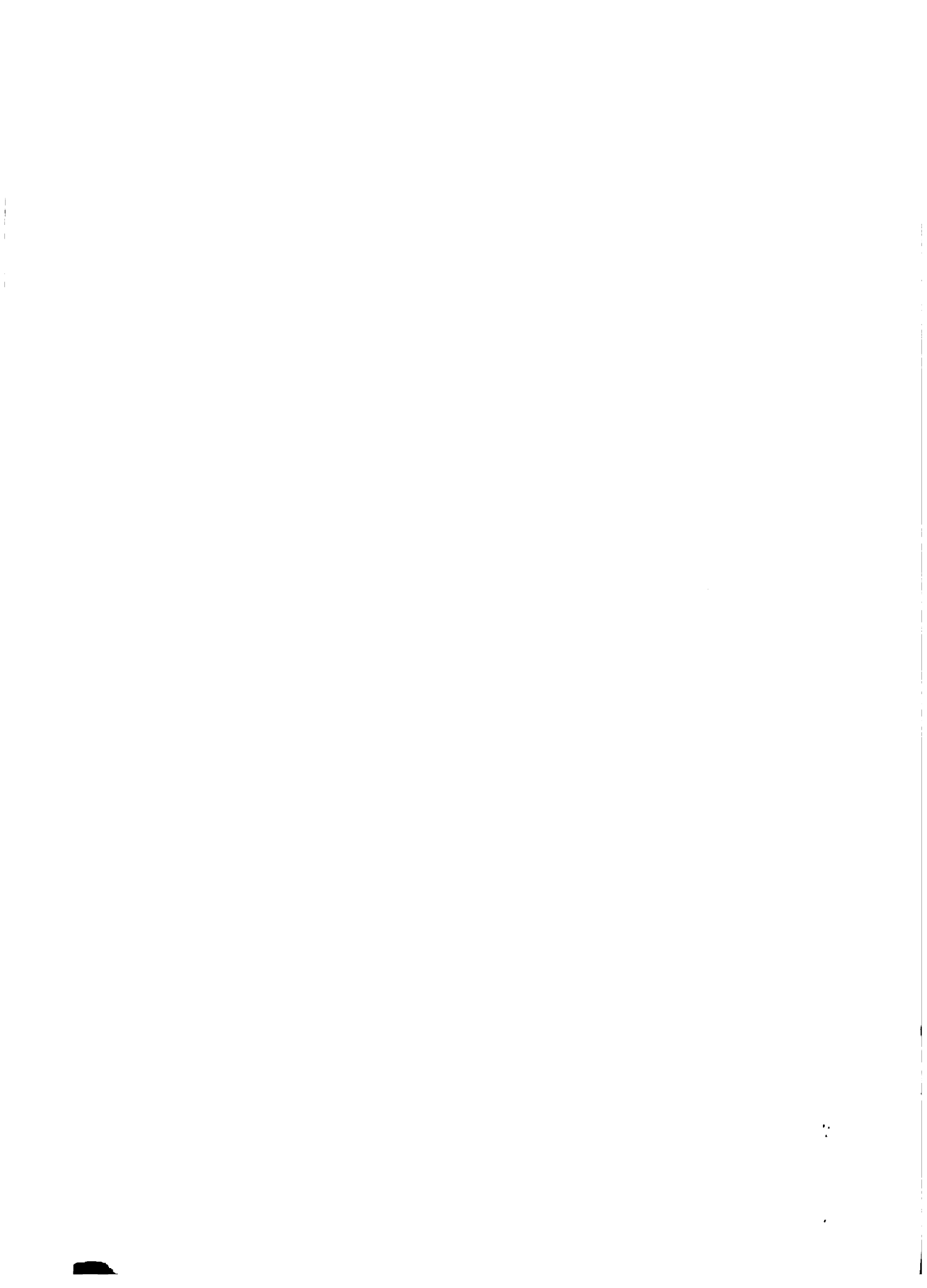
NOMOGRAMA V





NOMOGRAMA VI





FÓRMULAS

Diferentes pesquisadores têm desenvolvido fórmulas distintas com o propósito de obter a condutividade hidráulica dos solos a partir dos dados coligidos pelo método do trado. Algumas destas fórmulas são baseadas em uma solução teórica exata da equação de Laplace e outras são apenas soluções aproximadas (Luthin, 1957).

Ernst (1950) desenvolveu fórmulas para distintas condições, tal como se mostra a seguir:

a. Solo homogêneo e a camada impermeável a grande profundidade

Quando a camada impermeável está mais profunda que o fundo do poço ($S > 0$), a condutividade hidráulica pode se calcular a partir da seguinte fórmula:

$$K = \frac{4000}{(H/r + 20) (2 - y/H)} \frac{r \Delta y}{y \Delta t} \quad 7.2$$

onde:

K: condutividade hidráulica (m/dia)

H: profundidade do poço, abaixo do nível freático (cm)

y: distância entre o nível freático e o ponto médio dos níveis de água no intervalo de tempo Δt (cm)

r: raio do poço (cm)

Δy intervalo da altura no tempo Δt (cm)

Esta fórmula não mostra a relação exata que deve existir, teoricamente, entre as diferentes quantidades. De acordo a Ernst o valor de K assim obtido tem uma precisão da ordem de uns 20%, caso preencha as seguintes condições:

$$\begin{aligned} 3 &< r < 7 \\ 20 &< H < 200 \\ &y > 0,2 H \\ &S > H \\ &\Delta y \leq 1/4 y_0 \end{aligned}$$

b. Solo homogêneo e fundo do poço na camada impermeável

Quando o poço é construído de tal modo que seu fundo coincida com a camada impermeável ($S = 0$), a condutividade hidráulica pode ser calculada mediante a seguinte fórmula:

$$K = \frac{3600}{(H + 10r)(2 - y/H)} \frac{r^2}{y} \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad 7.3$$

onde o significado de cada variável, é o mesmo indicado no caso anterior.

c. Solo não homogêneo de duas camadas

No caso de um solo cujo perfil é constituido por duas camadas que têm uma significativa diferença em suas condutividades, Ernst propôs a construção de dois poços de diferentes profundidades, tendo o lençol freático situado na camada superior.

Por razões práticas, o poço superficial deve ser perfurado, no mínimo, até 20 cm abaixo do nível freático e até não mais de 10-15 cm acima do limite de ambos os horizontes. O poço mais profundo deverá ser construido com o mesmo critério (Figura 7.3).

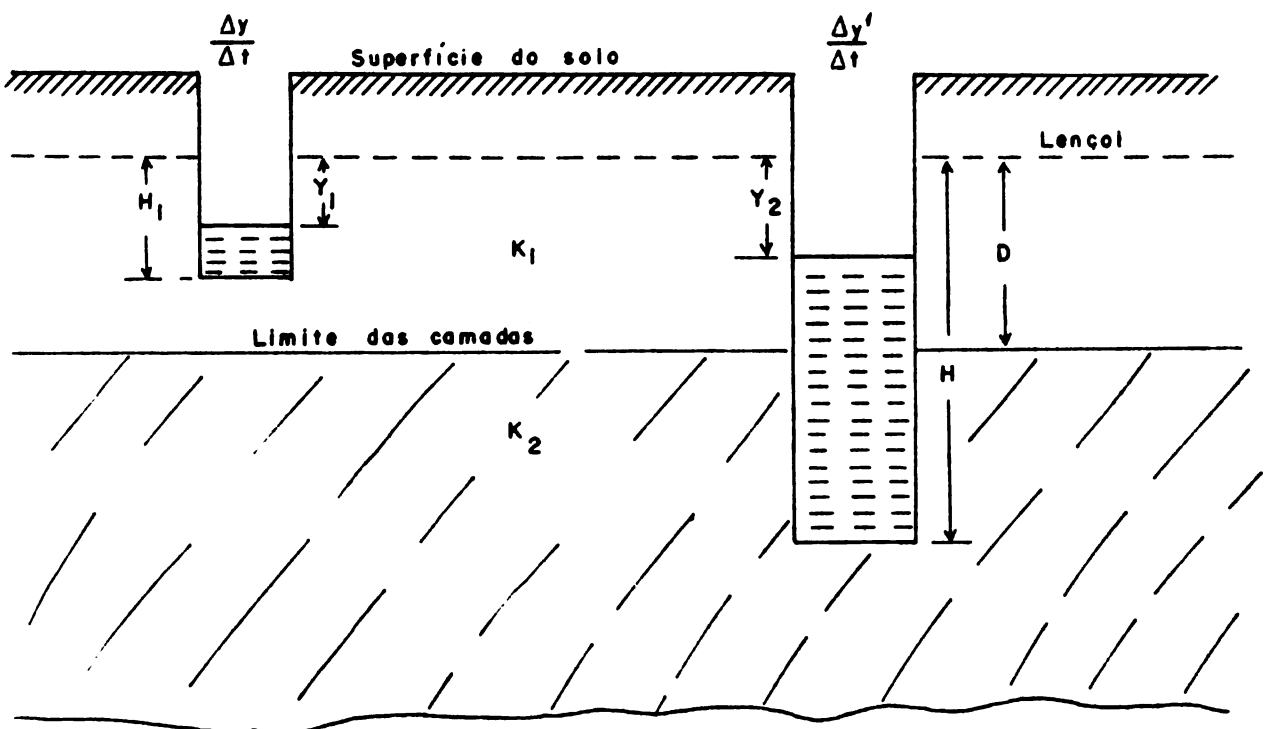


Figura 7.3. Método do poço simples para solo de duas camadas.

Se chamarmos K_1 a condutividade hidráulica da camada superior e K_2 a da inferior, a velocidade de elevação da água no poço mais profundo é dada por:

$$\frac{\Delta y'}{\Delta t'} = \frac{K_1}{C_0} + \frac{K_2}{C_2} - \frac{K_2}{C_2} \quad 7.4$$

onde:

$$K_2 = \frac{C_0 \Delta y' / \Delta t' - K_1}{C_0 / C_2 - 1} \quad 7.5$$

K_1 é calculado do poço superficial, tal como se se tratasse de um solo homogêneo, a partir da seguinte relação:

$$K_1 = C_1 \frac{\Delta y}{\Delta t}$$

$\Delta y / \Delta t$ é a velocidade de elevação no poço superficial

$\Delta y' / \Delta t'$ é a velocidade de elevação no poço profundo

Os valores C_1 e C_2 são obtidos dos nomogramas $S = 0$ ou $S > 0,5 H$, dependendo da situação da camada impermeável, a partir de H_1 e y_1 , e de H_2 e y_2 , respectivamente.

O valor de C_0 é obtido com D e y_2 , nos nomogramas $S = 0$

O exemplo de cálculo a seguir, indica o procedimento que se faz necessário a fim de obter os valores de K_1 e K_2 mediante o método do trado para solo de duas camadas (Figura 7.3).

Exemplo 2. Obtenção da condutividade hidráulica num solo de duas camadas, mediante o método do trado, com dois poços a distintas profundidades.

a. Dos dados de campo, tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta Y}{\Delta t} &= 0,16 & H_1 &= 70 \\ & & y_1 &= 30 \\ & & S &> 0,5 H \\ & & r &= 4 \\ C_1 &= 9,4 \quad (\text{Nomograma I}) \\ K_1 &= C_1 \frac{\Delta Y}{\Delta t} = 9,4 \times 0,16 \\ K_1 &= 1,5 \text{ m/dia} \end{aligned}$$

$$b. \frac{\Delta y'}{\Delta t'} = 0,26$$

$$H_2 = 150$$

$$y_2 = 40$$

$$\underline{S > 0,5 H}$$

$$C_2 = 3,9 \text{ (Nomograma I)}$$

$$D = 100$$

$$y_2 = 40$$

$$\underline{S = 0}$$

$$C_0 = 6,3 \text{ (Nomograma II)}$$

$$K_2 = \frac{C_0 \Delta y' / \Delta t' - K_1}{C_0 / C_2 - 1} = \frac{6,3 \times 0,26 - 1,5}{6,3 / 3,9 - 1} = \frac{0,14}{0,62}$$

$$K_2 = 0,22 \text{ m/dia}$$

7.2. Método do Piezômetro

De conformidade às características do estudo que se pretende realizar, é de interesse conhecer, em alguns casos, a condutividade hidráulica de todas, e cada uma das camadas existentes no perfil do solo.

Isto é de fundamental importância quando se estuda o delineamento de um sistema de drenagem em um solo de origem aluvial, estratificado, onde as características físicas de cada camada, influem diretamente com a profundidade na qual devem ser instalados os drenos.

Se o solo em questão tiver apenas duas camadas, pode-se empregar o procedimento descrito anteriormente. Entretanto, se o solo tiver três ou mais camadas, recomenda-se o uso do piezômetro, instrumento especialmente idealizado para tal situação.

Este método, que em essência consiste em fazer com que a água subterrânea flua até uma cavidade construída a uma profundidade desejada, e tal qual no método do trado, a velocidade com que a água penetra na cavidade ao extremo do tubo nos dá uma medida da condutividade hidráulica deste horizonte. Entretanto, se o diâmetro da cavidade é pequeno, 3 a 5 cm, e seu comprimento é de várias vezes o diâmetro, mede-se a condutividade horizontal. Pelo contrário, se o diâmetro é superior ao comprimento é possível obter uma medida da condutividade vertical (Boersma, 1965).

No processo seguido para a determinação da condutividade hidráulica mediante o método do piezômetro, podemos destacar as seguintes fases:

- A. Instalação do tubo
- B. Construção da cavidade
- C. Medidas da recuperação do nível freático
- D. Determinação da condutividade hidráulica

A. Instalação do tubo

Da mesma maneira que o método do trado, é necessário levar em consideração o local no qual se realizará a determinação da condutividade hidráulica, que não deve ser escolhido ao azar, mas sim resultado do produto de uma seleção cuidadosa com o objetivo de garantir que dito ponto seja um fiel representante das características predominantes na área em estudo.

Após selecionado o local e a profundidade na qual se realizará a determinação, proceder-se-á uma limpa na superfície do solo de todo e qualquer material estranho existente (grama, etc.) que possa dificultar a entrada do tubo e/ou que possa ser arrastado pelo extremo inferior do mesmo, provocando fissuras na zona de contato entre ambos (Luthin e Kirkham, 1949).

O tubo é enterrado 15 cm, e se tradea no interior dele. Logo se enterra mais outros 15 cm e tradea novamente. Desta maneira, perfurado cada vez 15 cm e em seguida introduzindo o piezômetro a outros tantos, continua-se até chegar à profundidade necessária.

Em um mesmo ponto do terreno um piezômetro pode efetuar a determinação da condutividade hidráulica a diferentes profundidades. Para isto só basta colocar o piezômetro à profundidade desejada, fazer a determinação e logo enterrá-lo a uma nova profundidade.

B. Construção da cavidade

Uma vez colocado o piezômetro à profundidade requerida continua-se perfurando cuidadosamente pelo seu interior até formar uma cavidade abaixo do extremo inferior do mesmo.

Após construída a cavidade, deixa-se que a água alcance sua posição de equilíbrio permitindo assim, que se processe uma limpeza dos poros que por ventura tenham-se obstruído pelo efeito do atrito com o trado.

Para realizar a extração da água pode-se utilizar uma bomba manual semelhante à da Figura 7.2. Mas, para que se extraia a água do interior do poço e do piezômetro, sua única característica será ter um diâmetro inferior ao diâmetro interno do piezômetro.

C. Medidas da recuperação do nível freático

A determinação dos diferentes níveis de água no interior do piezômetro (Figura 7.4) pode-se obter por vários métodos. Aconselha-se o emprego do suporte e boia assinalados anteriormente, onde apenas variará o tamanho da boia a fim de que este tenha livre curso pelo interior do piezômetro. Também pode utilizar-se uma sonda elétrica. Os eletrodos se colocam numa nova posição cada vez que o circuito se fecha. Mede-se o tempo que leva a água a chegar a uma nova posição.

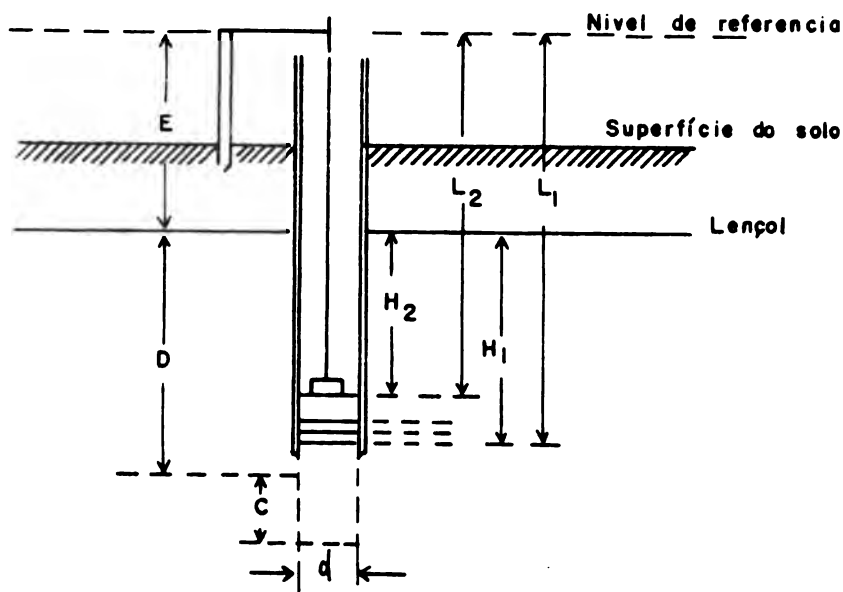


Figura 7.4. Esquema das medidas no campo para determinar a condutividade hidráulica pelo método do piezômetro.

De acordo ao assinalado na Figura 7.4, os dados do terreno obtêm-se da seguinte maneira:

- a. Logo que se tenha alcançado a posição de equilíbrio da água no interior do piezômetro, baixa-se a boia até este ponto e a leitura assim obtida se registra E na folha de anotações correspondente (Registro II).
- b. Retira-se a boia e bombea-se total ou parcialmente a água existente no interior do piezômetro colocando em seguida, tão rápido quanto possível a boia em contato com a água. Esta posição, L_1 , registra-se simultaneamente com t_1 , que é o instante em que a boia toca a superfície da água.
- c. Em seguida, a trena metálica presa à boia começará a subir, registrando as diferenças de leitura em referência à posição anterior. De conformidade à textura do solo em que se está realizando a experiên

cia, ficará a critério do operador selecionar o tempo transcorrido, sendo este, em todo o caso, L_1 para t_1 ; L_2 para t_2 ;; L_n para t_n .

Ainda que as determinações possam ser realizadas de qualquer ponto entre o nível freático e o fundo da cavidade, devem-se evitar medidas próximas ao ponto de equilíbrio da água no interior do piezômetro.

- d. Semelhante ao método do trado deverá observar-se que ΔH (cujo valor é igual a $H_1 - H_2$), não seja superior a $1/4$ de H_1 ; posto que à medida que nos aproximamos da posição de equilíbrio do nível freático, diminuirá a velocidade com que esta flue para o interior da cavidade.

D. Determinação da condutividade hidráulica

Se na realização da experiência usou-se como piezômetro um tubo de $1\ 3/4$ polegadas (4,38 cm) de diâmetro interno e tenha-se construído uma cavidade de 3 polegadas (7,5 cm) de profundidade, é possível utilizar o Nomograma VII na determinação da condutividade hidráulica.

Entretanto, devido a que nem sempre estas exigências são possíveis de se cumprir, a condutividade hidráulica pode ser obtida a partir das fórmulas seguintes (Kirkham, 1946).

FÓRMULAS

a. Equação de Kirkham

$$K = \frac{2,3 \pi r^2}{A(t_2 - t_1)} \log \frac{L_1 - E}{L_2 - E} \quad 7.6$$

que é o mesmo que,

$$K = \frac{2,3 \pi r^2}{A(t_2 - t_1)} \log \frac{H_1}{H_2}$$

onde:

K: condutividade hidráulica (cm/seg)

r: raio interno do tubo (cm)

H_1 : distância entre o nível da água no tempo t_1 e o lençol freático (cm)

H_2 : distância entre o nível da água no tempo t_2 e o lençol freático (cm)

$t_2 - t_1 = \Delta t$: tempo que leva a água para movimentar-se de H_1 para H_2 (seg)

A: fator geométrico dos componentes do fluxo, que é denominado Função A e é dado pela relação entre o diâmetro da cavidade e seu comprimento.

A função A é o único valor que não pode ser obtido facilmente no terreno e sua determinação é feita mediante o método de analogias elétricas. As Figuras 7.5, 7.6 e 7.7 mostram as variações da Função A, obtidas dos trabalhos realizados por Luthin e Kirkham (1949).

A seleção da figura adequada depende das características dos instrumentos empregados na determinação da condutividade hidráulica. Se se tem uma cavidade de 2,5 cm de diâmetro deve-se usar a Figura 7.5. Entra-se com o valor do comprimento usado e obtêm-se o valor da Função A. Contrariamente, se o comprimento da cavidade é fixado em 10 cm, então pode-se usar a Figura 7.6 onde se entra com o valor do diâmetro da cavidade para obter a Função A.

Finalmente, quando as características da cavidade não correspondem a nenhuma das figuras indicadas, é possível obter a Função A utilizando a Figura 7.7 onde se apresenta em termos das relações A/R e C/R.

b. Equação do escoamento interno (Kirkham)

Esta equação é muito semelhante à anterior, eliminando-se o uso de logaritmos, facilitando o cálculo da condutividade. É expressa da seguinte forma:

$$K = \frac{\pi r^2}{A(t_2 - t_1)} \frac{\Delta H}{H_m} \text{ cm/seg} \quad 7.7$$

onde:

ΔH : incremento na altura da água dentro do tubo no tempo $t_2 - t_1$

$H_m = \frac{H_1 + H_2}{2}$: carga média

Os termos restantes são os mesmos descritos para a equação 7.6

Esta equação é suficientemente exata para valores reais de H e H_m podendo-se usar para simplificar os cálculos. O erro que se comete utilizando esta equação é de pouca importância se a relação $\Delta H/H_1$ for pequena, porém aumenta à medida que esta relação for aumentando. O erro no valor da condutividade é inferior a 4% nas relações $\Delta H/H_1$, menor de 0,5 e inferior a 10% quando esta relação ficar situada entre 0,5 a 0,7 (Richards, 1954).

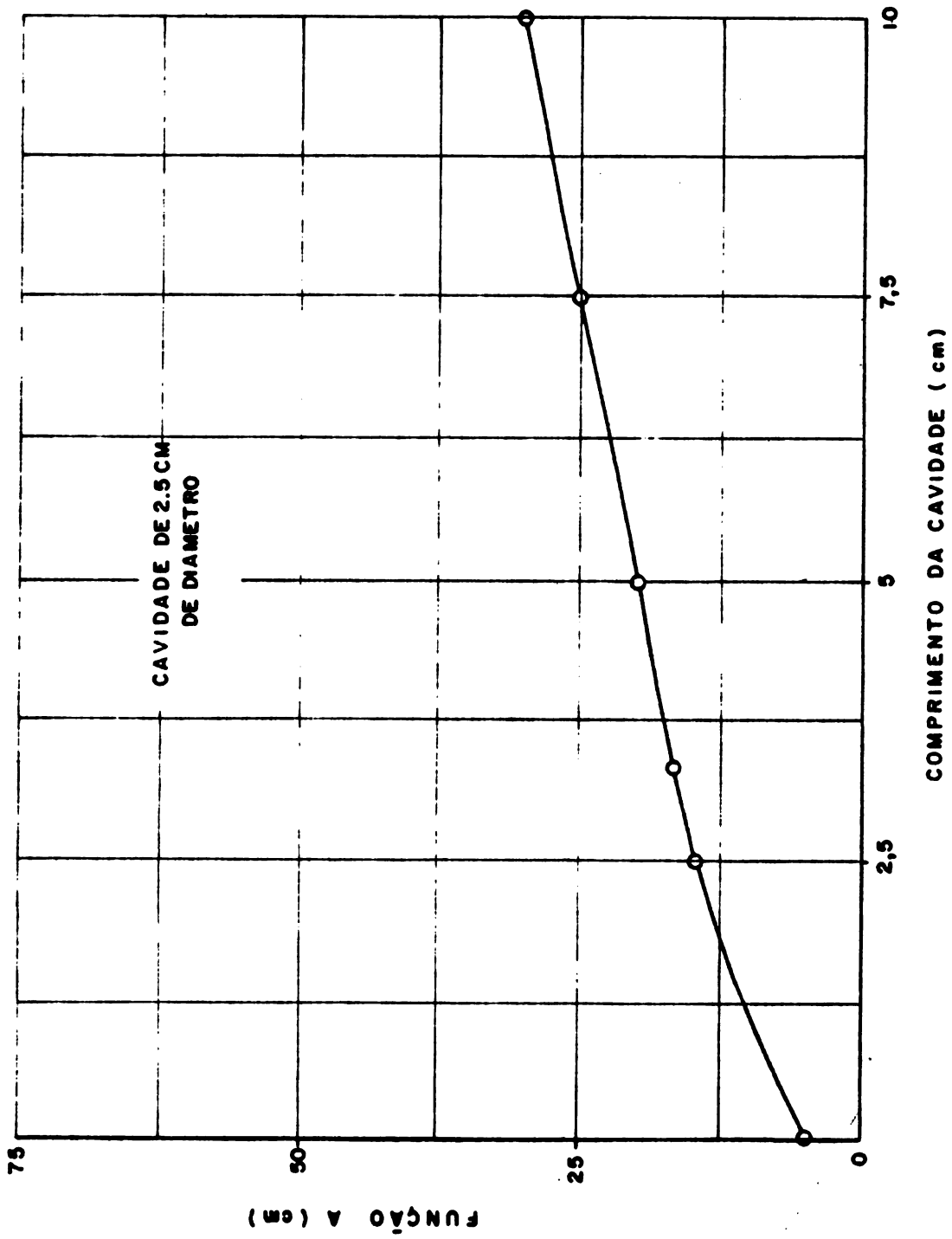


Figura 7.5. Relação entre a Função A e o comprimento da cavidade para uma cavidade de 2,5 cm de diâmetro. (Método do Piezômetro).

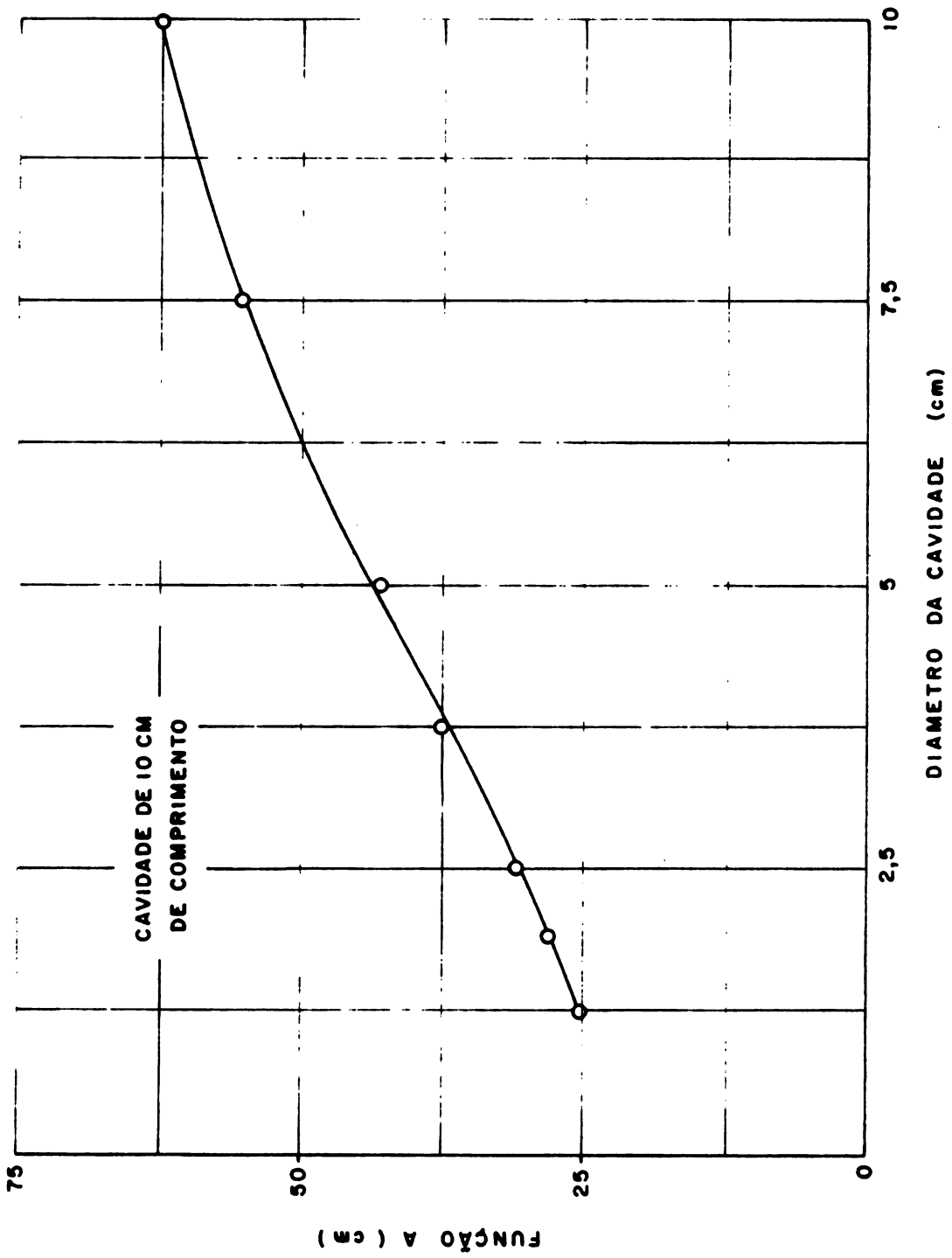


Figura 7.6. Relação entre a Função A e o diâmetro da cavidade para uma cavidade de 10 cm de comprimento. (Método do Piezômetro).



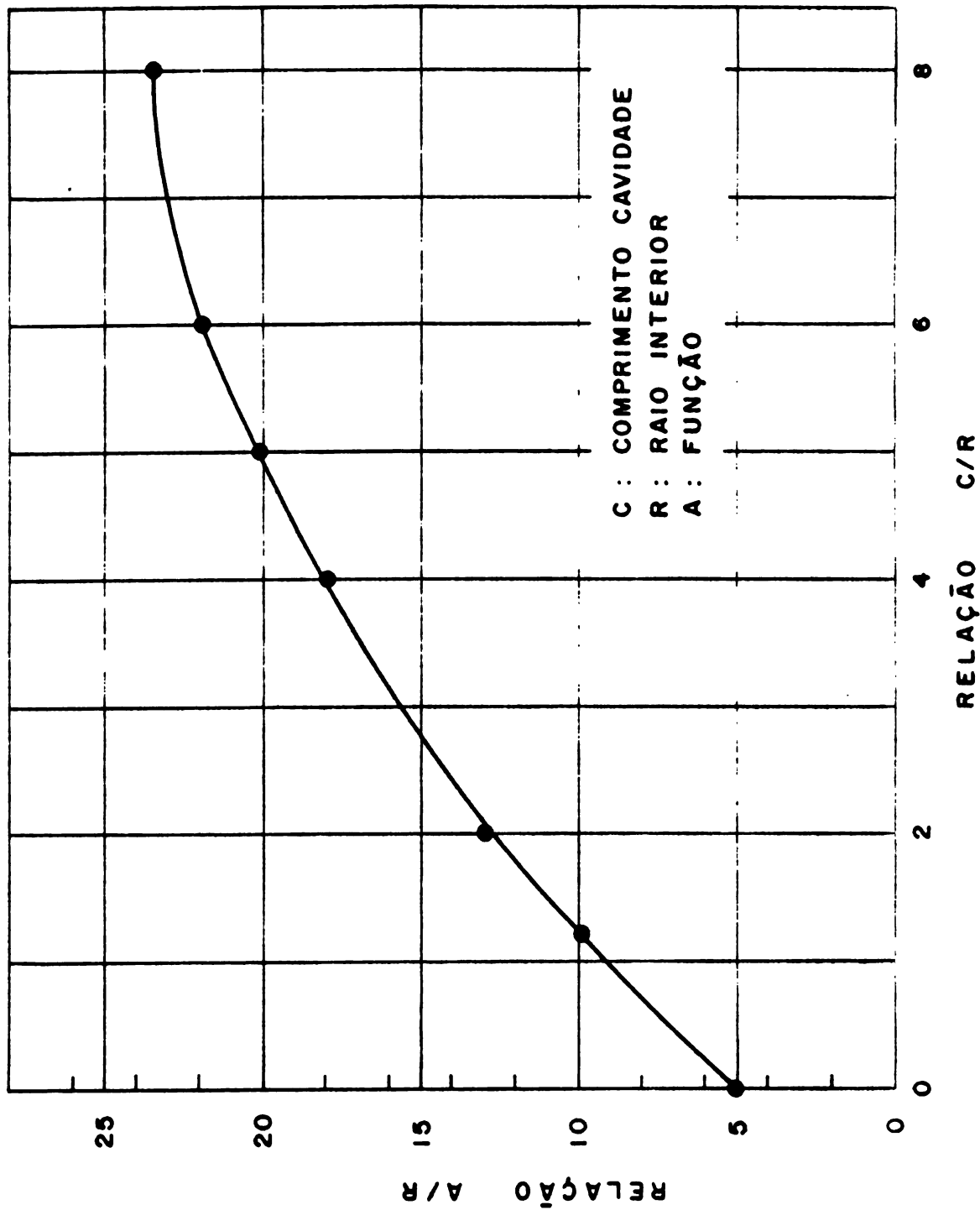
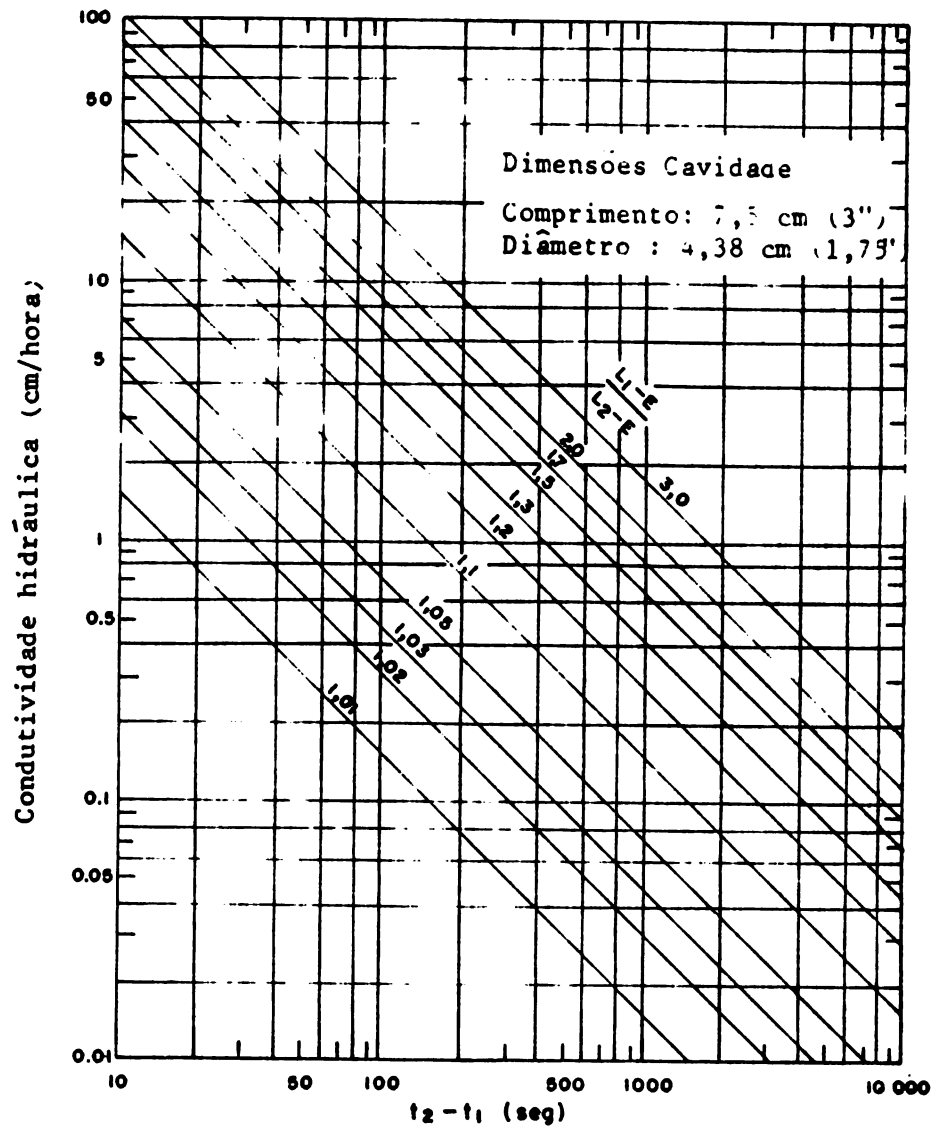


Figura 7.7. Relações entre A/R e C/R que permitem obter a Função A quando se utilizam cavidades de diferentes dimensões. (Método do Piezômetro).



NOMOGRAMA VII. Cálculo da condutividade hidráulica pelo método do piezômetro. Este Nomograma é válido só quando a cavidade tem 7,5 cm (3") de comprimento e 4,38 cm (1,75") de diâmetro.



8. DIAGNÓSTICO DO PROBLEMA DE DRENAGEM*

Os dados coletados nos estudos a que se refere o capítulo 6, devem ser elaborados e apresentados graficamente, a fim de que resultem num verdadeiro auxiliar ao formular o diagnóstico do problema. Tal elaboração, compreende a confecção de mapas, perfis, hidrogramas, etc., que serão considerados no presente capítulo.

Alguns mapas geralmente não são resultados das pesquisas de drenagem e nos vem de outros estudos do projeto, tal como ocorre com o de topografia, geologia do solo, uso atual da terra e salinidade. Enquanto que outros, são partes fundamentais destas pesquisas e por isto os discutimos em maior profundidade.

8.1. Mapas do lençol freático

Confecciona-se interpolando os dados de elevação ou cota do lençol freático, obtidos ao relacionar as leituras dos poços de observação a um plano de comparação. Apresenta-se na escala na qual está disponível a documentação cartográfica; ainda que tratando-se de estudos a nível de projeto, pode oscilar entre 1:5.000 e 1:25.000. As isolinhas do lençol freático, "isohypsas", podem estar a uma equidistância que varia entre 0,20 m e 0,50 m segundo os gradientes hidráulicos disponíveis. Uma regra prática para decidir a equidistância, consiste em dividir o desnível máximo (dado pela diferença entre o valor mais alto e o mais baixo), pelo número de curvas que desejaríamos ter em um determinado espaço.

Do mapa de "isohypsas" pode-se obter várias conclusões: 1) direção do fluxo; 2) gradiente hidráulico; 3) área de recarga e/ou descarga; 4) valor relativo da condutividade hidráulica. As "isohypsas" referidas num determinado plano de comparação, representam, por sua vez, linhas de igual carga hidráulica, ou equipotenciais. Dado que as linhas de fluxo em condições isotropas são normais às equipotenciais e se orientam em direção aos potenciais decrescentes, o mapa define claramente a direção do fluxo, em geral ou parcialmente. Por exemplo, na Figura 8.1, o fluxo é de NW a SE e uma convergência até o SE. A Figura 8.2 mostra, em contrário, uma divergência à direção do fluxo.

* Tradução parcial do capítulo correspondente do Manual de Drenagem do Dr. C.J. Grassi

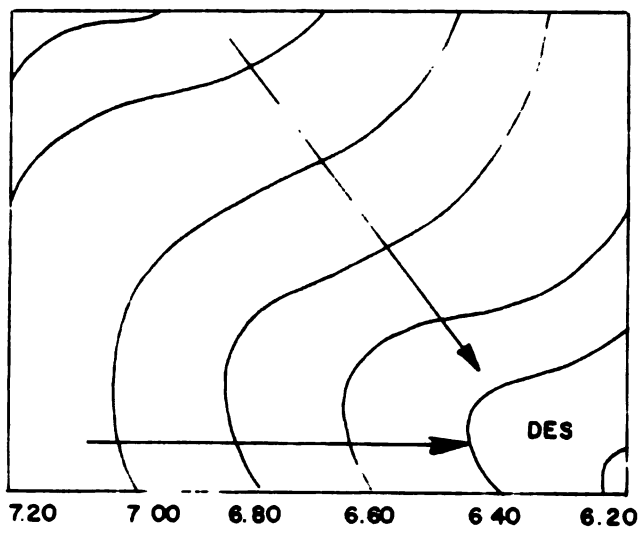


Figure 8.1

Mesmo assim, as "isohypsas" permitem localizar áreas de recarga. Por exemplo, linhas concêntricas e de valores crescentes, Figura 8.3 individualizam uma "montanha de água" e uma área de recarga, digamos por efeito da irrigação.

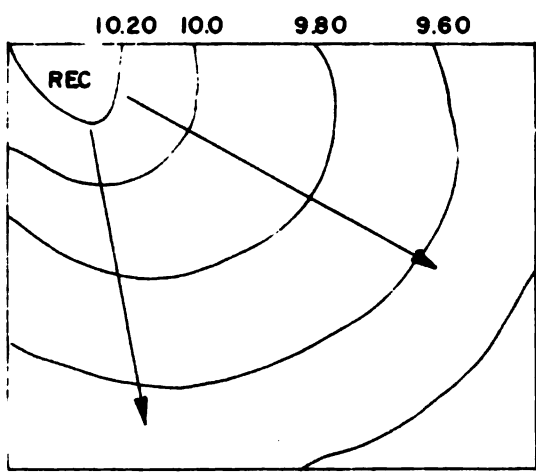


Figure 8.2

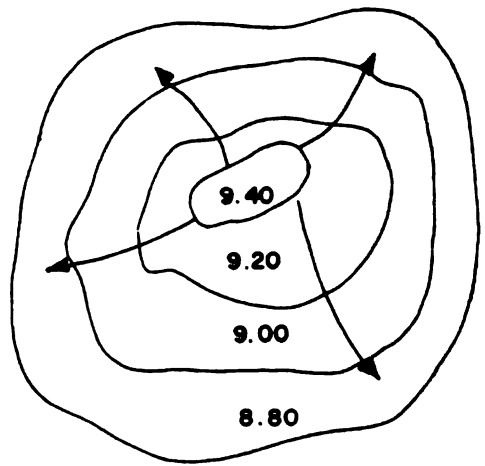


Figure 8.3

Um câmbio no gradiente hidráulico pode estar relacionado com a condutividade hidráulica ou transmissibilidade da camada. Em tal caso a equação de Darcy permite tirar conclusões com respeito às características relativas da camada. Se por exemplo, evidenciamos claramente que Q se mantêm constante, mas varia o gradiente, podemos escrever:

$$Q = T_1 i_1 = T_2 i_2$$

onde $T = KD$ = transmissibilidade

Ou seja, que os gradientes são inversamente proporcionais às transmissibilidades de forma que i varia com T . Se contrariamente, sabemos que T é o mesmo, então o gradiente varia com a variação de Q :

$$Q_1 = T i_1; \quad Q_2 = T i_2$$

Dado que, os níveis freáticos são dinâmicos, ou seja, trocam em função do tempo, cada leitura correspondente a uma data determinada, permite a confecção de um mapa. Se durante o ano todo tivermos irrigação e/ou chuva, dispõe-se de informação suficiente para o delineamento, ainda que isto não signifique que devam suspender-se as observações.

O mapa que corresponde ao nível máximo e o que corresponde ao nível mínimo tem particular importância, principalmente pelas diferenças de cota entre os dois, que assinala a ascensão com o regime de recarga existente e a capacidade de descida vinculada à drenagem natural.

8.2. Mapa de profundidade do lençol freático

Como em cada poço de observação, no qual se mede o nível freático também se conhece o nível do terreno, a diferença representa a profundidade à qual se encontra o lençol. Se traçarmos por interpolação as isolinhas correspondentes, "isobatas", tem-se um mapa que permite delimitar as áreas com diferente grau de severidade do problema.

Se se fixa uma escala nas profundidades do plano freático: 0 m a 0,50 m, 0,50 a 1,00 m, 1 m a 1,50 m, etc., e se planimetram as áreas correspondentes, obtêm-se as superfícies absolutas e relativas que correspondem a cada categoria. Este é o mapa mais importante para justificar ou não, a realização de uma obra de drenagem, já que, é o que permite realizar uma análise agroeconômica, determinar a necessidade e viabilidade de uma obra, sendo portanto, o "mapa de trabalho" de maior relevância prática.

Podem-se usar na sua confecção, os dados lidos diretamente dos poços de observação, ou por diferenças obtidas ao sobrepor o mapa de curvas de nível do terreno com o de curvas de nível do freático. No ponto de cruzamento de ambas cu

vas, acha-se diretamente o valor da diferença. Trabalhando apenas com estas diferenças, obtem-se o mapa de "isobatas", por interpolação.

Para se dar um quadro mais completo da severidade do problema, convém traçar as "isobatas" não para uma data determinada, mas sim selecionando para cada poço, o valor mínimo de um período crítico (por exemplo, 4 a 6 meses). O emprego de côres para as diferentes sub-áreas ou de um estriado especial, permite visualizar o problema e a importância do mesmo.

8.3. Mapa de profundidade à "barreira"

Tal como se expressou anteriormente, a "barreira" ou estrato limitante do movimento gravitacional da água, encontra-se às vezes a pouca profundidade, facilmente reconhecível, inclusive nos mapas de solo. Em ocasiões, o edafólogo distingue facilmente uma capa apertada ou folgada, sobre um "duripan" ou uma camada de calcário.

Não obstante, devido o conceito relativo de camada impermeável, já exposto, convém adotar critérios para definir a "barreira". Luthin (1965) considera que, quando a permeabilidade do sub-solo é de aproximadamente 1/10 da do solo superficial, pode-se considerá-lo impermeável. O método seguido pelo Bureau of Reclamation (1964), expressa que um determinado estrato é considerado "a barreira" se a condutividade hidráulica for menor que 1/5 da condutividade hidráulica ponderada dos estratos por sobre o mesmo:

$$K_3 < \frac{K_1 H_1 + K_2 H_2}{5(H_1 + H_2)}: \text{"Barreira"}$$

O mapa de profundidade à "barreira" é preparado da mesma maneira que no caso anterior, interpolando isolinhas com base aos pontos situados no mapa. Se a "barreira" está próxima à superfície e foi alcançada na maior parte dos poços de observação, o número de dados disponíveis para confeccionar este mapa é o mesmo que os anteriores. Perfis longitudinais e transversais, Figura 8.4, permitem visualizar a situação da "barreira", tal como mostra Donnan et al. (1954).

Quando a "barreira" está mais profunda e somente uns 10% dos poços permite reconhecê-la, os dados disponíveis são então poucos e dificilmente pode-se traçar isolinhas na mesma escala do mapa. Em tal caso, os perfis geológicos existentes e os perfis das perfurações de poços para abastecimento de água, são de

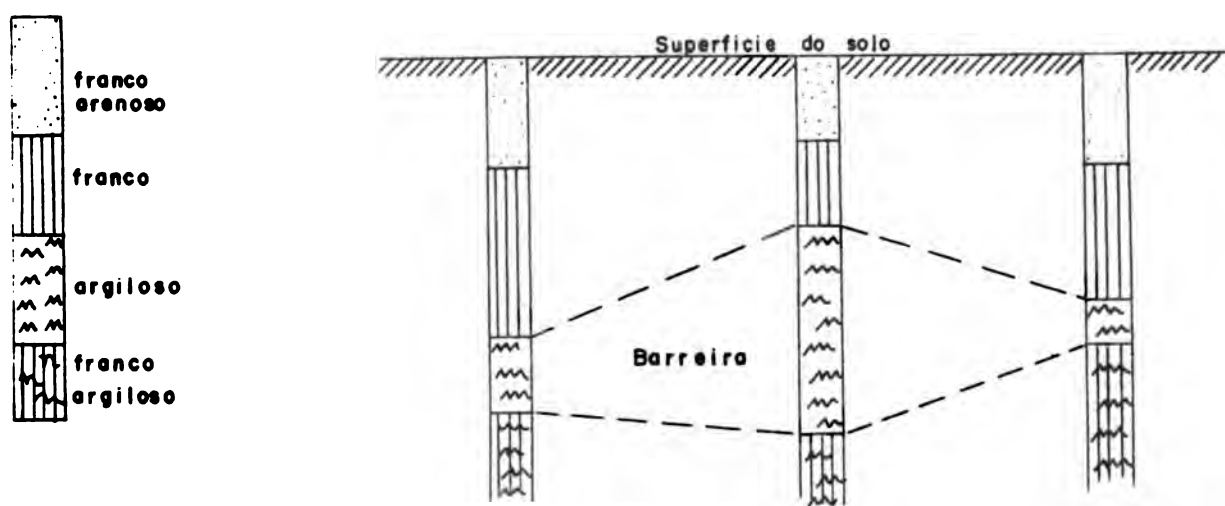


Figura 8.4. Descrição do perfil do solo até a barreira e esquema representando a variação de profundidade da barreira.

grande utilidade para situá-los e vinculá-los com o problema da drenagem.

Se se dispõe da informação correspondente pode-se confeccionar um mapa de isolinhas ou de curva de nível da barreira, o qual permite obter várias conclusões.

Primeiramente, com relação a cada poço, a diferença entre a cota do nível freático e do nível da "barreira" representa a espessura do estrato transmissor de água, e da mesma maneira como se obteve o mapa de "isobatas", pode-se confeccionar um mapa de espessura do estrato transmissor de água, que tem grande utilidade prática. Por exemplo, se se conhece o K do estrato, o valor de T fica definido ($T = KD$), assim, os gradientes se obtêm do mapa de "isohypsas" e consequentemente, pode-se calcular o caudal que entra e/ou sai da área.

8.4. Mapas de permeabilidade

Se se dispõe de informação suficiente, na área dos solos que compreende o sistema de drenagem, é possível delimitar sub-áreas de diferentes permeabilidades. A escala de K deve ser escolhida com amplitude em cada classe, de modo a evitar uma sub-divisão excessiva nas sub-áreas, cuja superfície não justifique um tratamento separado do delineamento.

Geralmente, não se dispõe de suficientes ensaios de campo para situar as linhas divisórias. Não obstante, informações adicionais como é o mapa do solo, geológico, a descrição dos perfís dos poços de observação e inclusive determinações de laboratório em amostras ajudam na tarefa do estabelecimento de sub-áreas.

Às vezes este mapa se usa como "informação de retorno" para classificar os solos do ponto de vista agrológico por sua aptidão para a irrigação considerando que a "drenabilidade", definida aqui por um valor numérico de K, é um fator de avaliação na classificação do Bureau of Reclamation, o qual certamente se conhece quando se mede.

O mapa de permeabilidade serve conjuntamente com o de profundidade ao nível freático e o de uso atual da terra, para apresentar o grau de severidade do problema em relação à capacidade de transmissão da água dos estratos.

Finalmente, o valor de K desde que intervem na equação básica do movimento da água em meios permeáveis, permite adotar critérios com respeito aos métodos de drenagem mais adequados e constitui um dado básico para o delineamento. Sua

relação nas áreas, mediante o mapa correspondente, é imprescindível para definir profundidade e espaçamento dos drenos, quando se conhece a distância à "barreira".

8.5. Perfis do nível freático

Os perfis do lençol freático, se confeccionam na direção do fluxo, com o objetivo de ter uma idéia mais clara dos gradientes disponíveis e suas mudanças. Também servem para reconhecer mais claramente a zona de recarga e descarga e determinar a localização topográfica mais adequada para os drenos interceptores.

Para interceptar um perfil, se requer incluir outros dados, dos quais são disponíveis com relação a cada poço de observação: descrição do perfil do solo, cota do terreno e cota da "barreira". Mudanças no gradiente hidráulico, podem se explicar por mudança na espessura das camadas transmissoras de água ou nas características físicas das mesmas.

8.6. Perfis piezométricos

A leitura dos níveis numa bateria de piezômetros, instalados a diferentes profundidades, permite definir direção e gradiente do fluxo. Empregam-se comumente para pesquisas especiais com a finalidade de localizar áreas de recarga e de descarga.

A Figura 8.5 contém a leitura de piezômetros instalados em diferentes profundidades. As isolinhas de igual pressão, assinalam que estas diminuem até o dreno e em consequência há um fluxo radial que mostra a efetividade do funcionamento do mesmo. Este procedimento se emprega igualmente no caso de um dreno artificial ou de um curso artificial: rio ou arroio que possa atuar como tal.

A Figura 8.6 mostra um fluxo em direção contrária ao lençol, o que assinala que o mesmo está atuando como uma área de recarga dos aquíferos. Podem em tal caso tratar-se de um leito natural: rio, de um canal de irrigação, de um deságue superficial, ou, inclusive de um dreno que conduz água de excedentes superficiais, e que no período de baixo nível freático, recarga os aquíferos.

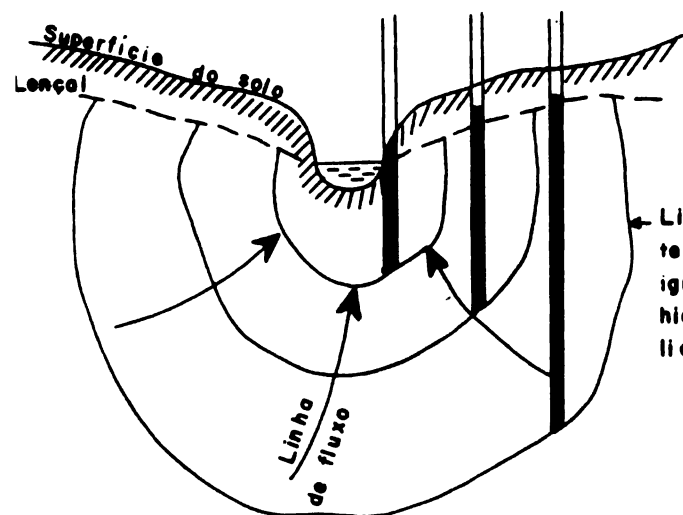


Figura 8.5

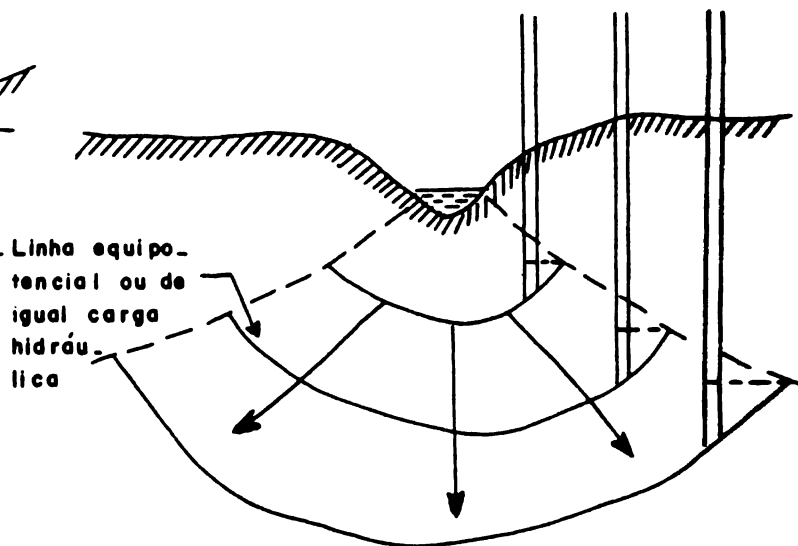


Figura 8.6

Outra conclusão que se pode obter da leitura de uma bateria de piezômetros, é a existência de camadas confinadas, que conduzem à existência de pressão artesianas, originando problemas de drenagem no solo superficial.

Se os gradientes, $i = h_L/L$, variam para piezômetros situados em diferentes profundidades, significa que muda o valor de K nas camadas.

Piezômetros que alcançam o mesmo estrato e estabelecidos sobre uma linha, permitem confeccionar um perfil piezométrico. Quando se dispõe de pelo menos dois piezômetros em baterias localizadas a determinadas distâncias, em cada bateria pode-se localizar o nível freático. O nível freático se encontra na intersecção da reta que junta as cargas hidráulicas e a reta que passa pelo extremo inferior dos tubos.

Não obstante aqui nos termos referidos aos piezômetros para realizar pesquisas especiais, localizadas, existem casos nos quais podem-se empregar em uma rede, da maneira descrita para os poços de observação e em lugar dos mesmos. Quando não existem gradientes verticais, e piezômetros a diferentes profundidades registram o mesmo nível, significa que não há diferença de pressão e em tal caso o piezômetro e o poço de observação, registram a mesma medida. As vantagens

do piezômetro sobre o poço de observação para a instalação de uma rede, segundo Christiansen (1966) são: 1) baixo custo dos materiais; 2) comodidade de instalação; 3) precisão nas medições; 4) velocidade nas determinações.

8.7. Hidrograma

Os hidrogramas são representações dos níveis de água em função do tempo. Do nosso ponto de vista para o diagnóstico da drenagem, interessa o hidrograma de variação dos níveis freáticos e das possíveis fontes de excesso d'água: rio, riacho, chuva; etc. e a análise da possível relação entre os mesmos. A concordância ou não entre hidrogramas de poços de observação e da suposta fonte de recarga, serve para confirmar ou desmentir o efeito das mesmas no problema em consideração.

Os hidrogramas de poços de observação correspondem a determinados pontos que têm maior importância nos aspectos que nos interessa pesquisar, e se confeccionam com registros de tempo: mensais, quinzenais, semanais ou diários. O hidrograma mensal ou quinzenal, nos dá uma clara idéia da marcha periódica dos níveis e sua relação com os períodos de carga: estação de irrigação, ou de chuvas. Os hidrogramas semanais e diários, servem para analisar mais precisamente o efeito de uma determinada fonte de recarga, por exemplo, uma irrigação com determinada lâmina d'água.

Por sua vez, os hidrogramas comparativos dos diferentes poços, permitem estabelecer se obedecem ou não à mesma lei de variação. Dois hidrogramas de poços vizinhos que correlacionam adequadamente, assinalam que se pode eliminar um e estimar os níveis por meio do outro. Isto poderia conduzir a um menor número na rede de observação, resultante da experiência obtida nas mesmas condições.

A inclusão em um só gráfico dos hidrogramas do poço e das possíveis fontes de recarga, como uma forma de visualizar a origem do problema, é sem dúvida, um procedimento recomendável.

Quando um rio ou arroio, atua como área de descarga durante o período de enchente, o rio pode não só ser ineficiente, como também atuar inversamente, recarregando os aquíferos em áreas vizinhas sobrelevando os níveis de toda a área. Em tal caso, o estudo dos hidrogramas do rio com relação ao dos poços, pode ajudar a definir a necessidade de um coletor interno paralelo ao rio e comportas que assegurem a evacuação durante o período de seca, pois que impede a entrada

d'água no período da enchente. Neste caso, a única possibilidade de drenagem é por elevação mecânica.

8.8. Programa de ação

A análise cuidadosa da documentação obtida e em especial a superposição dos mapas aos quais fizemos referências anteriormente, permite estabelecer a natureza e extensão do problema de drenagem e adotar um programa de ação, que pode consistir em: 1) medidas de tipo preventivo para reduzir a recarga; 2) obras gerais a nível de distrito; 3) obras de drenagem e reabilitação integrais.

As medidas de tipo preventivo, consistem em reduzir a recarga artificial da água, devidas às ações do homem. Uma eficiência de irrigação muito baixa, unida a subida dos níveis freáticos, assinalam a necessidade de melhorar as práticas de irrigação e/ou a administração do sistema. A distribuição da água de acordo às exigências das culturas, estimadas pelos procedimentos convencionais e a adequada sistematização dos terrenos para a irrigação, pode conduzir a uma substancial redução das fontes de recarga dos aquíferos.

As obras gerais a nível de distrito, compreendem a instalação de uma rede geral de coletores que pode consistir na retificação e aprofundamento de leitões existentes, por uma parte, e construção de outros a fim de garantir o funcionamento de uma rede principal, que consta de: um coletor matriz, coletores secundários e terciários. A principal rede de coletores permite a instalação de terciários a distâncias que podem oscilar entre 1/2 Km a 2 Km e que em determinadas condições resolvem em seu total o problema de drenagem. Em outros casos, as obras gerais consistem no revestimento de canais, total ou parcialmente, quando radica nas mesmas áreas de recarga.

As obras de drenagem e reabilitação integrais, consistem na instalação de drenos destinados a interceptar o fluxo lateral e/ou criar gradientes destinados a regular a saída às águas, que naturalmente não poderiam ser evacuadas sem a elevação do lençol freático. Compreende principalmente as obras a nível de prédio, com drenos que exigem consideráveis inversões. No caso de existir solos já salinizados, incluem-se aqui os procedimentos de reabilitação baseados em lavagens, com ou sem prévia aplicação de corretivos.

Não obstante os estudos básicos, fornecerem ao técnico experimentado a informação necessária para tomar decisões sobre o problema em sí, convém nos tra-

balhos de drenagem, avançar parcialmente por etapas, adquirindo experiência que servirá para melhorar a etapa seguinte. A instalação de drenos ou poços experimentais, segundo o caso, aliados a observação do seu funcionamento, através das determinações que lhes são pertinentes, permitem comprovar nossas conclusões e ajustar o procedimento na etapa seguinte.

De um modo geral, os dados obtidos num coletor primário, permite-nos delinear os secundários. Medidas realizadas nestes, leva-nos a igual procedimento com os terciários, e, finalizando, o funcionamento dos coletores terciários ajuda-nos a definir a necessidade de drenagem a nível da parcela, seu método mais conveniente e detalhes de seus delineamentos.

9. ESPAÇAMENTO DOS DRENOS

No delineamento de um sistema de drenagem, um dos fatores mais importantes é o espaçamento dos drenos.

Baseando-se nos princípios do fluxo da água subterrânea e fazendo simplificações derivaram-se várias fórmulas para determinar o espaçamento dos drenos.

Nas fórmulas para o cálculo do espaçamento dos drenos deve-se considerar as seguintes informações:

- a. Características hídricas dos solos
- b. Necessidades da profundidade do lençol freático
- c. Necessidade da capacidade de descarga

As necessidades de profundidade do lençol freático dependem de:

- culturas
- clima
- tipo do solo
- processo de salinização

As necessidades de capacidade de descarga dependem de:

- clima
- métodos de irrigação
- filtrações
- tipos do solo
- culturas

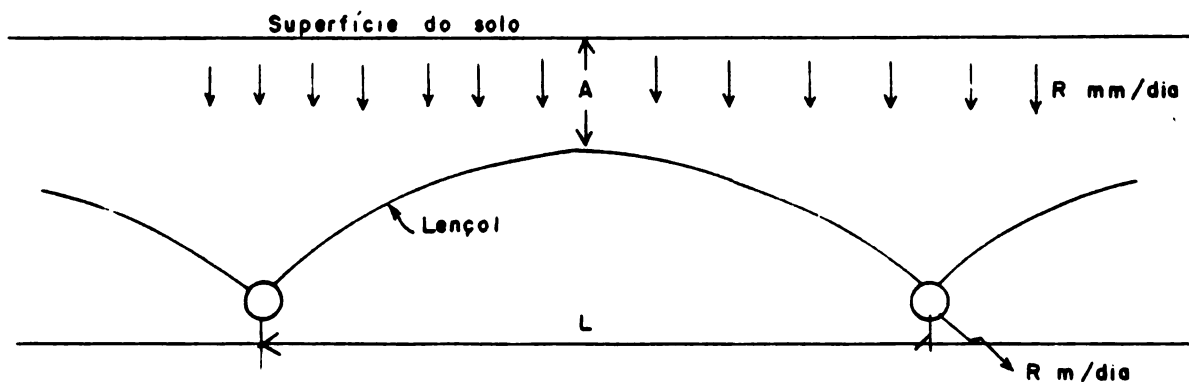
Normas de drenagem e sua formulação

As necessidades de profundidade do lençol freático e da capacidade de descarga, em conjunto, são denominadas normas de drenagem.

As necessidades ou normas de drenagem podem ser formuladas em diversas maneiras.

1.^a forma: Com uma descarga de R mm/dia, o lençol freático deve ser mantido a uma profundidade de A metros abaixo da superfície do solo.

Este é um caso de fluxo permanente onde a capacidade de descarga dos drenos é igual à recarga.



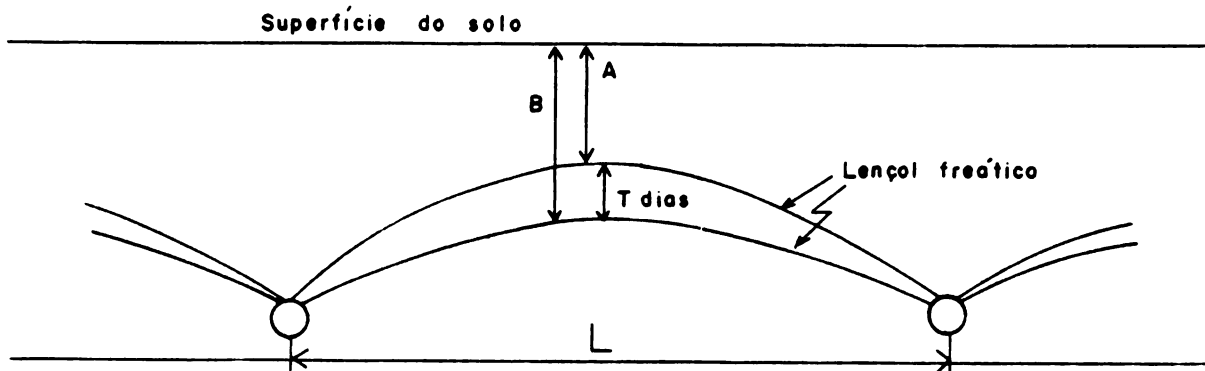
A: Profundidade normativa

R: Descarga normativa

L: Espaçamento dos drenos

2.^a forma: O lençol freático deve baixar em um tempo T dias de A metros a B metros abaixo da superfície do solo, supondo que não choverá durante estes T dias.

Este é um caso de fluxo não permanente (flutuante); onde a capacidade de descarga dos drenos não é igual à recarga.



A: Profundidade inicial

B: Profundidade final

T: Tempo disponível para o lençol descer de A para B

L: Espaçamento dos drenos

FÓRMULAS

A. Fluxo permanente

- a. Donnan (Fluxo horizontal)
- b. Hooghoudt (Fluxo horizontal e radial)
- c. Ernst (Fluxo vertical, horizontal e radial)

B. Fluxo não permanente (flutuante)

- d. Glover-Dumm (Fluxo horizontal)

9.1. Fórmula de Donnan

Uma das soluções mais comuns aos problemas de fluxo em estado permanente está baseada na suposição do fluxo horizontal a qual permitiu desenvolver a fórmula de Donnan. Esta fórmula baseia-se na equação da elipse, e foi desenvolvida especificamente para as condições sob irrigação e empregou-se com êxito no Vale Imperial da Califórnia.

Condições supostas na derivação

- a. O fluxo até os drenos é permanente
O lençol freático permanece constante
- b. O fluxo é somente horizontal
- c. Solo homogêneo até a capa impermeável
- d. Sistema de drenos paralelos, infinitos em ambas direções
- e. A recarga (R) é homogeneamente distribuída

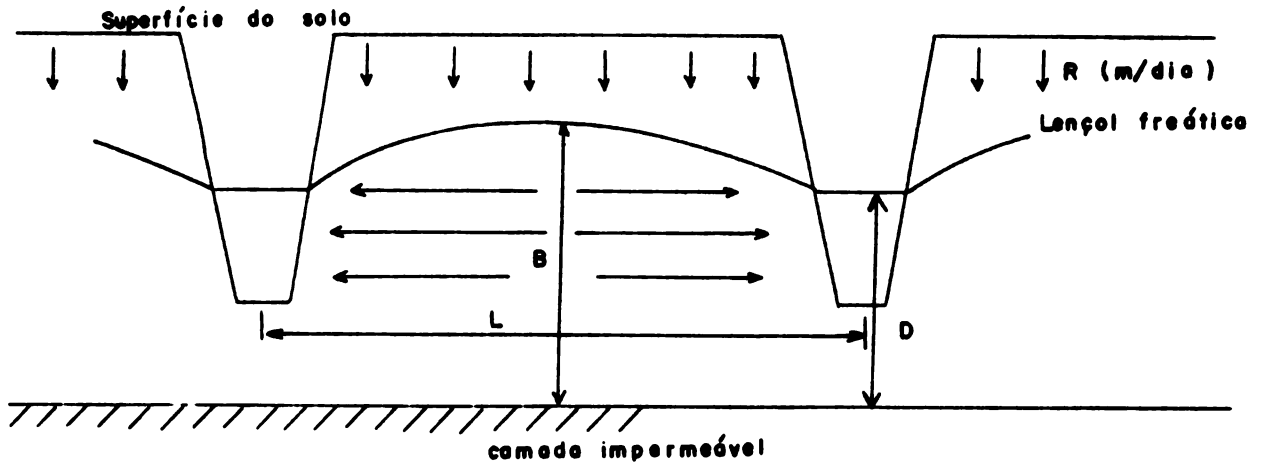
A fórmula derivada por Donnan tem a seguinte expressão:

$$L^2 = \frac{4K(B^2 - D^2)}{R} \quad 9.1$$

onde:

- L: espaçamento dos drenos (m)
- K: condutividade hidráulica (m/dia)
- B: distância do lençol freático do ponto médio dos drenos até a camada impermeável (m)
- D: distância da superfície da água, da vala ou do tubo de drenagem até a camada impermeável (m)
- R: quantidade d'água a drenar (m/dia). Também conhecida como coeficiente de drenagem.

Esquema para valas



Se a drenagem é efetuada com tubos que ficam colocados sobre a camada impermeável, a fórmula anterior se deduz a:

$$L^2 = \frac{4 K B^2}{R}$$

9.2

devido a que é de pouca importância a altura da água dentro do tubo.

A fórmula de Donnan (9.1) aplica-se, principalmente, a valas abertas cujo fundo termina ou situa-se próximo ao estrato impermeável.

Informações necessárias:

- Conhecer o valor da condutividade hidráulica (k) até uma profundidade de ligeiramente maior que a profundidade dos drenos.
- Profundidade do estrato impermeável.
- Normas de drenagem (Profundidade e recarga do lençol freático).
- Profundidade dos drenos.

Exemplo:

Uma área irrigada tem que ser drenada a uma profundidade de 1,80 m. A profundidade da camada impermeável é de 6,8 m e $K = 0,8$ m/dia. O sistema deverá ser delineado de tal forma que, com uma recarga do excesso da água de irrigação

que aumenta o lençol freático em 1 mm/dia, não deve elevar-se a um nível superior que 1,50 m abaixo da superfície.

Dados:

$$R = 1 \text{ mm/dia} = 0,001 \text{ m/dia}$$

$$K = 0,8 \text{ m/dia}$$

$$D = 6,8 - 1,8 = 5,0 \text{ m}$$

$$B = 6,8 - 1,5 = 5,3$$

Substituindo estes valores na equação (9.1), obtemos:

$$L^2 = \frac{4 \times 0,8 (5,3^2 - 5,0^2)}{0,001} = 9888$$

$$L = 99,4 \text{ m}$$

Neste cálculo não está incluído a resistência radial ao fluxo da água. Se isto for feito, o espaçamento diminui.

9.2. Fórmula de Hooghoudt

Esta fórmula foi desenvolvida na Holanda para condições de fluxo permanente. Utiliza as mesmas suposições de Donnan incluindo além do fluxo horizontal, o fluxo radial até os drenos.

A fórmula tem a seguinte expressão.

$$L^2 = \frac{8 K_2 d h}{R} + \frac{4 K_1 h^2}{R}$$

9.3

onde:

L: espaçamento dos drenos (m)

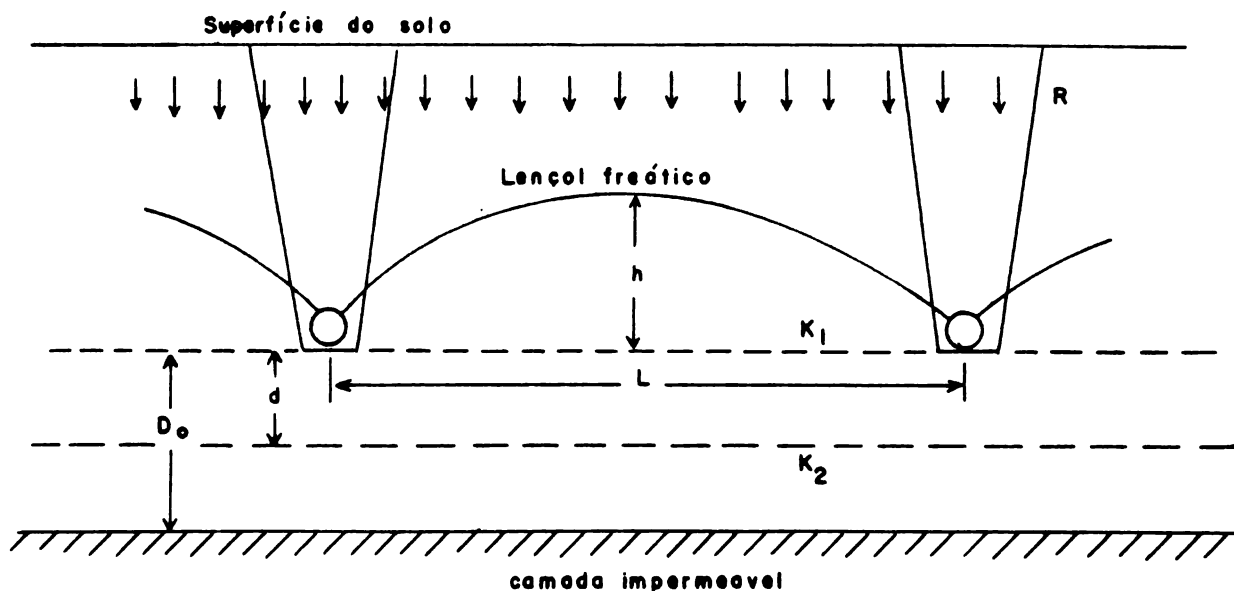
K_1 : condutividade hidráulica acima do nível dos drenos (m/dia)

K_2 : condutividade hidráulica abaixo do nível dos drenos (m/dia)

h: distância vertical entre a horizontal que passa ao nível do fundo dos drenos e o lençol freático no ponto médio daqueles (m)

d: espessura do "estrato equivalente" (m)

R: quantidade de água a drenar (m/dia)



A primeira parte da equação 9.3 representa o fluxo d'água trazido pelo solo abaixo dos drenos e a segunda parte representa o fluxo sobre os drenos.

Necessidades para sua aplicação

- A fórmula se baseia na presença de dois horizontes de diferentes condutividades hidráulicas, encontrando-se os drenos na interfase dos dois horizontes.
- Para solos homogêneos basta utilizar $K_1 = K_2$
- Esta equação pode ser utilizada quando os drenos situem-se sob a interfase. Quando se situam sobre esta, recomenda-se utilizar a fórmula de Ernst.
- Utilização adequada quando $D < \frac{1}{4} L$.

Estrato equivalente

Com o parâmetro d , espessura do "estrato equivalente", Hooghoudt introduziu na fórmula o fator da resistência radial que ocorre na zona próxima ao dreno.

A profundidade do "estrato equivalente" é função da espessura real do solo (D_0), do espaçamento dos drenos (L) e do raio dos tubos (r_0). Pode ser calculado mediante a seguinte expressão:

$$d = \frac{D_0}{2,55 \frac{D_0}{L} \left(\ln \frac{D_0}{r_0} \right) + 1}$$

Nesta fórmula, P é o perímetro molhado do dreno, que é igual a

$$P = \pi \cdot r_o \quad 9.5$$

O valor de r_o na equação (9.5) para o caso de valas abertas, se calcula pela seguinte relação.

$$r_o = \frac{P}{\pi} \quad 9.6$$

onde P é o perímetro molhado da vala.

Resolução da equação para o caso de drenos de manilha

a. Uso de tabelas

O único problema que a equação apresenta se deve à determinação do "estrato equivalente" (d). Como vimos, para obter d , é necessário conhecer D_o , r_o e L .

Hooghoudt preparou um jogo de tabelas dando valores a d segundo os valores de D_o , r_o e L .

Na Tabela 9.1 apresentam-se valores de d para $r_o = 0,10$ m em função de D_o e L . Considera-se que as variações atribuídas a r_o são relativamente pequenas e que, por outro lado, a vala aterrada tem um efeito favorável na resistência radial que ocorre. Por isto na Tabela 9.1 dá-se somente valores para $r_o = 0,10$ m, que podem ser usados para diferentes raios das manilhas. Outra forma de obter o valor de d é mediante o Nomograma VIII preparado por Hooghoudt e cuja explicação para seu uso é dada no mesmo Nomograma.

Procedimento para usar a Tabela 9.1

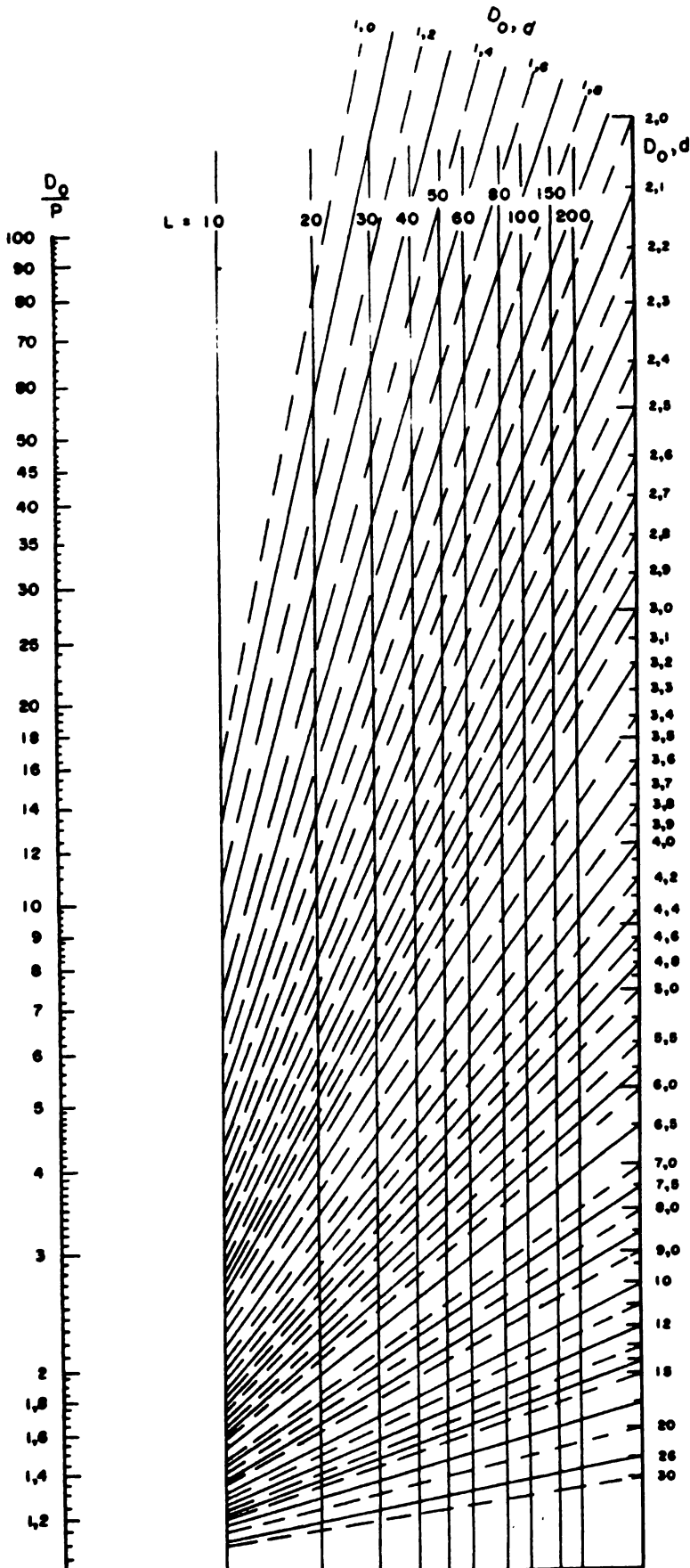
- a. Calcular um valor de L (L_{est}) com a fórmula (9.3) para um valor qualquer de d (usar $d = 1, 2, 3$, etc.)
- b. Usando L_{est} e o valor de D_o , obter um valor para d na Tabela (9.1) (d_t)
- c. Com o valor d_t calcular o valor de L (L_{cal})
- d. Se L_{est} e L_{cal} não forem iguais, efetua-se um novo cálculo com um valor d diferente, até aproximar os valores L_{est} e L_{cal} .

Exemplo

Dados:

$R = 5$ mm/dia

$K_1 = 0,5$ m/dia



NOMOGRAMA VIII

Nomograma para o cálculo do valor de "d" de Hooghoudt de acordo com a fórmula

$$d = \frac{Do}{2,55 \frac{Do}{L} (\ln \frac{Do}{P}) + 1}$$

Procedimento:

1. Escolha o valor apropriado para $\frac{Do}{P}$ e Do .
2. Mediante reta junte $\frac{Do}{P}$ à esquerda e Do à direita.
3. Encontre o ponto X onde a linha (2) e o valor escolhido de L se interceptam.
4. Leia o valor X à direita de Do,d da escala como o valor "d" de Hooghoudt.

Exemplo:

Se $\frac{Do}{P} = 15$ e $Do = 10$ m. então, com $L = 40$ m. significa que $d = 3,7$.

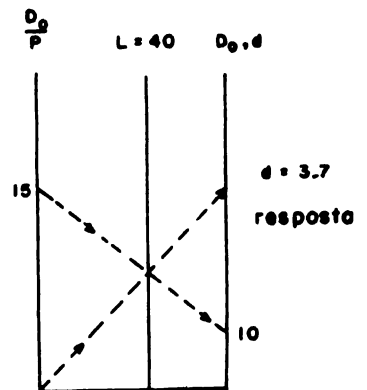


TABELA 9.1. Valores de $d(m)$, segundo Hooghoudt, para $r_0 = 0,10$ m

$D_0(m)$ $L_0(m)$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	∞
20	1.41	1.67	1.81	1.88							1.89
25	1.51	1.83	2.02	2.15	2.22						2.24
30	1.57	1.97	2.22	2.38	2.48	2.54	2.57				2.58
35	1.62	2.08	2.37	2.58	2.70	2.81	2.85	2.89			2.91
40	1.66	2.16	2.51	2.75	2.92	3.03	3.13	3.18	3.23	3.24	3.24
45	1.70	2.23	2.62	2.89	3.09	3.24	3.35	3.43	3.48	3.55	3.56
50	1.72	2.29	2.71	3.02	3.26	3.43	3.56	3.66	3.74	3.84	3.88
55	1.74	2.34	2.79	3.13	3.40	3.60	3.75	3.86	3.97	4.13	4.18
60	1.76	2.39	2.86	3.23	3.54	3.76	3.92	4.06	4.18	4.39	4.49
65	1.78	2.43	2.93	3.32	3.66	3.90	4.08	4.24	4.38	4.67	4.79
70	1.79	2.46	2.98	3.41	3.76	4.02	4.24	4.42	4.57	4.93	5.09
75	1.80	2.49	3.04	3.49	3.85	4.14	4.38	4.57	4.74	5.20	5.38
80	1.81	2.52	3.08	3.56	3.94	4.25	4.51	4.72	4.90	5.44	5.68
85	1.82	2.54	3.12	3.62	4.02	4.36	4.64	4.86	5.06	5.66	5.97
90	1.83	2.56	3.16	3.67	4.10	4.45	4.75	5.00	5.20	5.87	6.26
95	1.84	2.58	3.20	3.73	4.17	4.54	4.85	5.12	5.34	6.07	6.54
100	1.85	2.60	3.24	3.78	4.23	4.62	4.95	5.23	5.47	6.25	6.82
110	1.87	2.62	3.30	3.87	4.35	4.77	5.13	5.44	5.71	6.60	7.36
120	1.88	2.65	3.35	3.94	4.45	4.90	5.29	5.63	5.92	6.93	7.91
130	1.88	2.68	3.39	4.00	4.55	5.03	5.44	5.80	6.11	7.22	8.45
140	1.89	2.70	3.42	4.06	4.63	5.13	5.56	5.95	6.28	7.50	9.00
150	1.90	2.72	3.46	4.12	4.70	5.22	5.68	6.09	6.45	7.76	9.55
200	1.92	2.79	3.58	4.31	4.97	5.57	6.13	6.63	7.09	8.84	12.20
250	1.94	2.83	3.66	4.43	5.15	5.81	6.43	7.00	7.53	9.64	14.70

$$h = 0,60 \text{ m}$$

$$K_2 = 1 \text{ m/dia}$$

$$D_o = 3 \text{ m}$$

$$r = 0,10 \text{ m}$$

Utilizando a fórmula 3, obtemos,

$$L^2 = \frac{8 K_2 d h}{R} + \frac{4 K_1 h^2}{R} \quad 9.7$$

$$L^2 = 960 d + 145$$

- Para $d = 1$, usando a equação (9.8) obtêm-se $L_{est} \approx 35 \text{ m}$
- Com $L_{est} = 35 \text{ m}$ e $D_o = 3$ obtêm-se $d = 2,08$ da Tabela 9.1
- Com $d = 2,08$, usando a equação (9.8) obtêm-se $L_{cal} = 45 \text{ m}$
- Como L_{est} e L_{cal} são diferentes, faz-se uma nova tentativa, com valores diferentes para d .

Resumo das tentativas (valores aproximados)

$d(m)$	L_{est}	d_{tabela}	L_{cal}
1	35	2,08	45
2	45	2,23	47
3	55	2,34	48
2,25	48	2,25	48

b. Uso do Nomograma

Para resolver a fórmula de Hooghoudt preparou-se o Nomograma IX. Para demonstrar o modo de usar o Nomograma se utilizam os mesmos dados do exemplo anterior.

Procedimento:

- Com o valor de $h = 0,60 \text{ m}$ e $R = 5 \text{ mm/dia}$ encontram-se na tabela sob o Nomograma os seguintes valores:

$$\frac{8 h}{R} = 960 \quad \frac{4 h^2}{R} = 290$$

- Multiplica-se o primeiro valor por K_2 e o segundo por K_1 obtendo-se:

$$\frac{8 K_2 h}{R} = 960 \times 1 = 960$$

$$\frac{4 K_1 h^2}{R} = 290 \times 0,5 = 145$$

- c. Utilizando o Nomograma IX junte o ponto 960 do lado esquerdo e o ponto 145 do lado direito. O ponto de intersecção desta linha com a linha $D_o = 3$ m dá o espaçamento dos drenos L, igual a 47,5 m aproximadamente.

Resolução da equação para o caso de valas

Para o caso do cálculo do espaçamento de valas em solos homogêneos podem-se utilizar os Nomogramas X e XI.

Procedimento:

- a. Conhecendo D_o , Δh , u (perímetro molhado), K e R, calcule:

$$\frac{\Delta h}{u}, \quad \frac{K}{R} \quad \text{e} \quad \frac{D_o}{\Delta h}$$

- b. Obtenha o ponto de intersecção com os seguintes valores de $\frac{\Delta h}{u}$ e $\frac{D_o}{\Delta h}$
- c. Mediante reta junte o ponto obtido em (b) com o valor $\frac{K}{R}$, obtendo um valor X para $\frac{L}{\Delta h}$
- d. Logo calcule $L = \Delta h \cdot X$

Exemplo:

$$D_o = 3 \text{ m}$$

$$h = 0,6$$

$$u = 1,2$$

$$K = 1 \text{ m/dia}$$

$$R = 0,002 \text{ m/dia}$$

$$\frac{D_o}{\Delta h} = \frac{3}{0,6} = 5$$

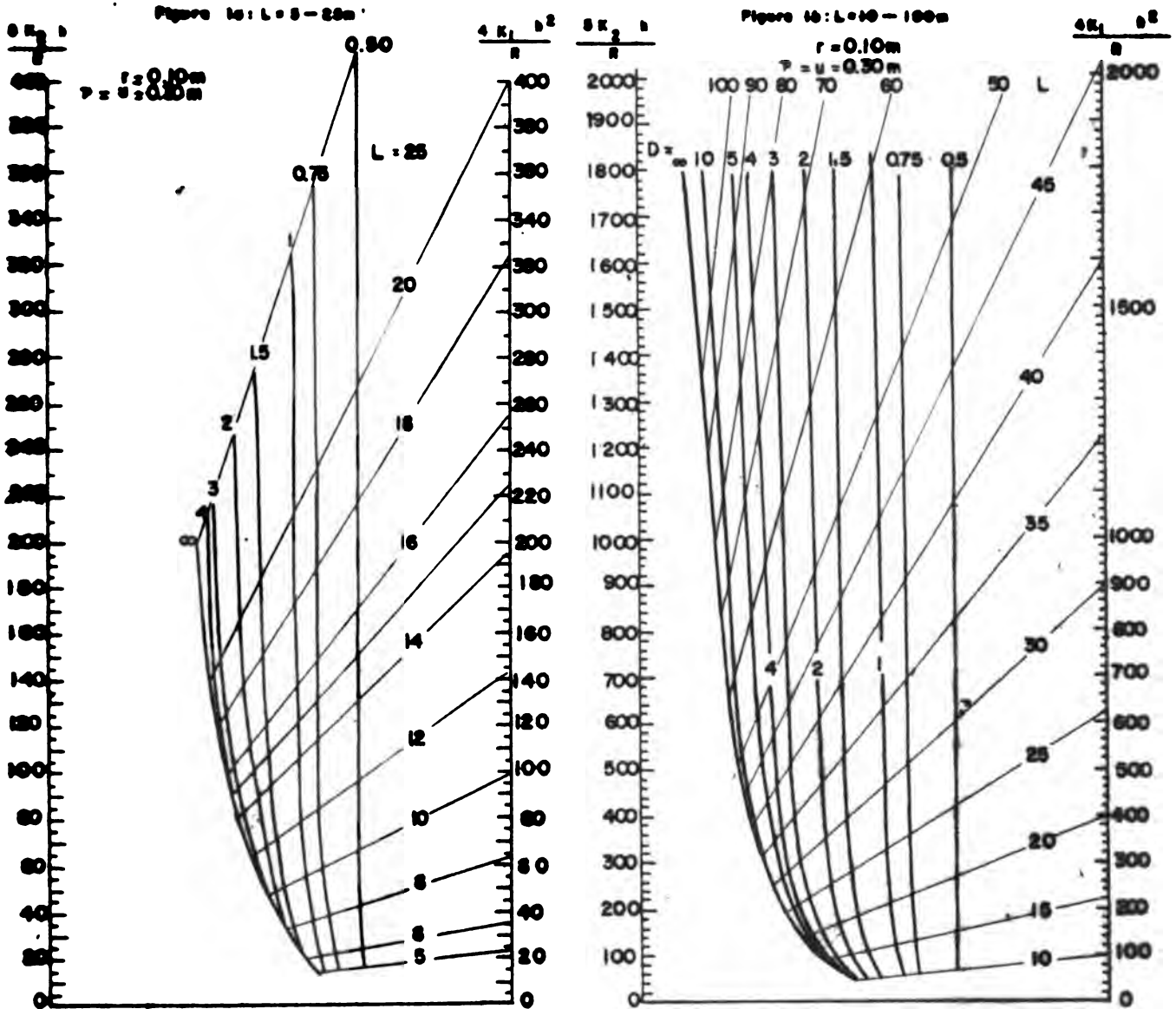
$$\frac{\Delta h}{u} = \frac{0,6}{1,2} = 0,5$$

$$\frac{K}{R} = \frac{1}{0,002} = 500$$

$$\frac{L}{\Delta h} = 140 \quad (\text{Nomograma XI})$$

$$L = 140 \times 0,6 = 84 \text{ m}$$

MONOGRAFIA IX - DETERMINAÇÃO DO ESPACAMENTO DE DREOS DE MAMULHAS (Pó-Duto de Respeito)



$\frac{h}{R}$ (primeiro número) e $\frac{4}{R}$ (segundo número) para vários valores de h e R

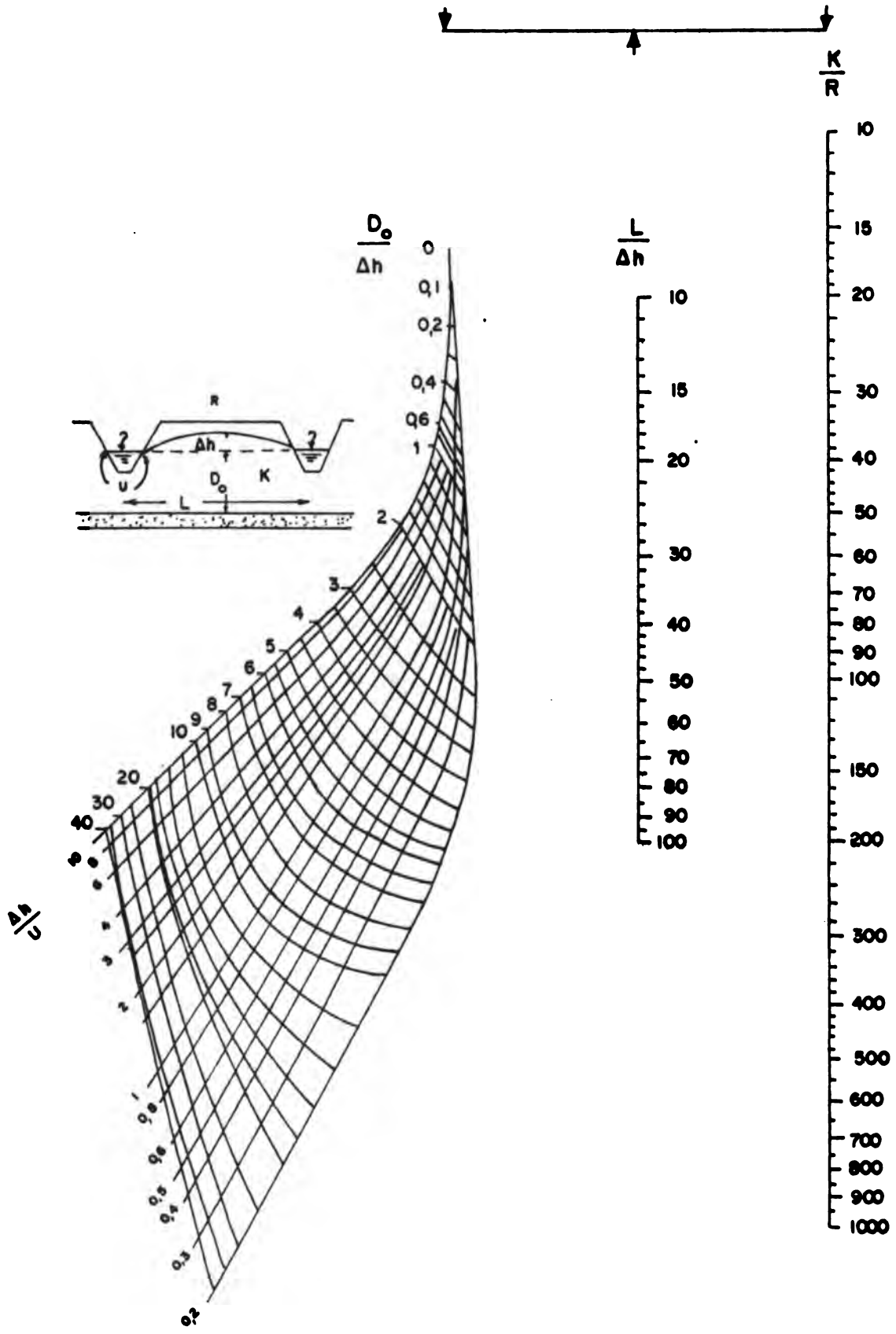
R (mm/dia)

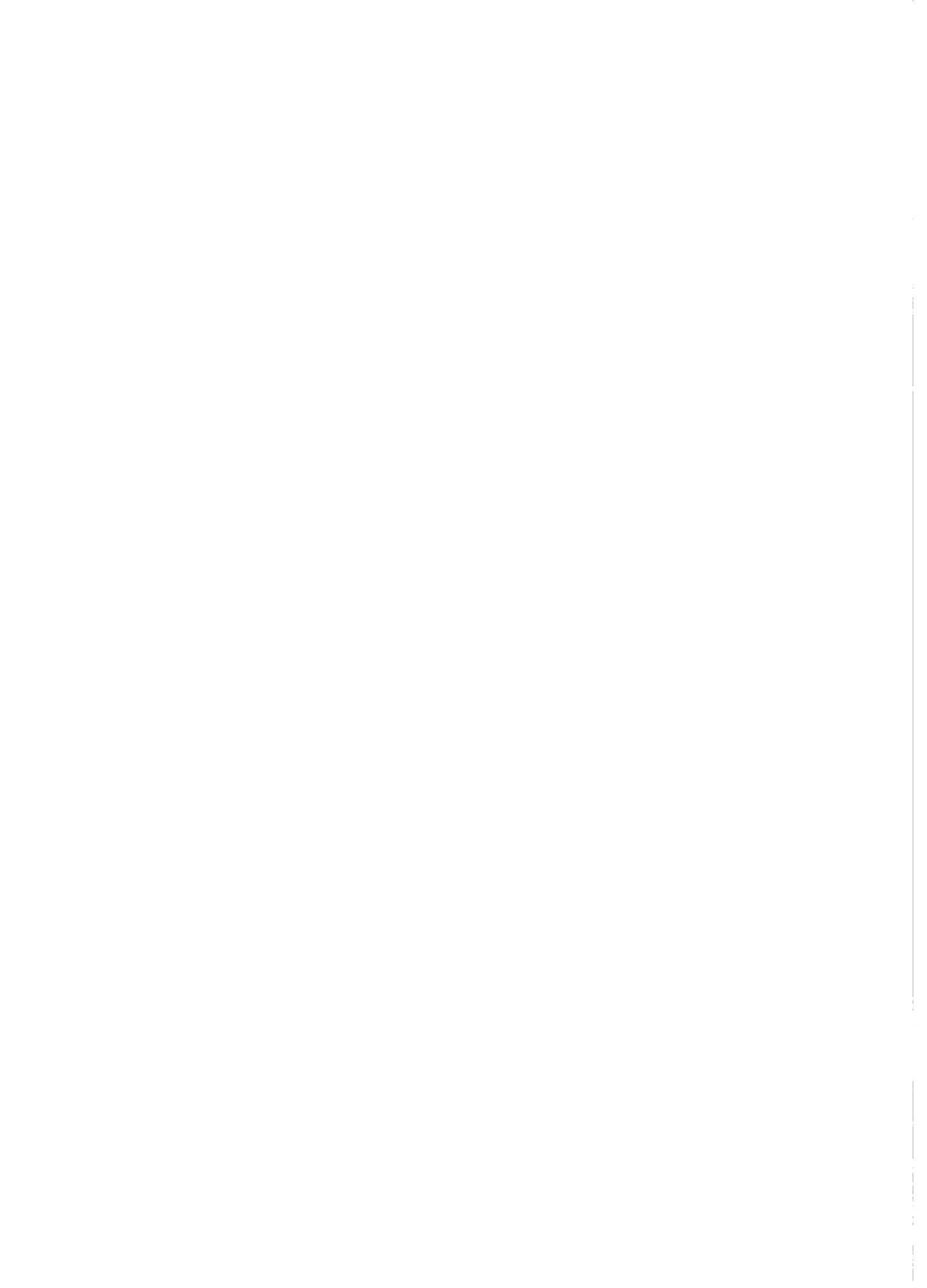
h (metros)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.1	800-40	400-20	265-15	200-10	160-8	135-10	115-5	100-5	90-5	80-5
0.2	1600-160	800-80	530-55	400-40	320-32	265-30	230-25	200-20	180-20	160-20
0.3	2400-360	1200-180	800-120	600-90	480-70	400-60	345-50	300-45	270-40	240-35
0.4	3200-640	1600-320	1070-215	800-160	640-130	530-110	455-90	400-80	360-70	320-65
0.5	4000-1000	2000-500	1340-335	1000-250	800-200	665-165	570-145	500-125	445-110	400-100
0.6	4800-1440	2400-720	1600-480	1200-360	960-290	800-240	685-205	600-180	535-160	480-145
0.7	5600-1960	2800-980	1860-650	1400-490	1020-390	930-325	800-280	700-245	620-215	560-195
0.8	6400-2560	3200-1280	2140-850	1600-640	1280-510	1070-425	915-365	800-320	710-235	640-255
0.9	7200-3240	3600-1620	2400-1030	1800-810	1440-630	1200-540	1030-460	900-405	800-370	720-325
1.0	8000-4000	4000-2000	2700-1330	2000-1000	1600-800	1330-665	1140-570	1000-500	890-445	800-400
1.1	8800-4840	4400-2420	2940-1600	2200-1210	1760-970	1460-805	1260-690	1100-605	980-535	880-435
1.2	9600-5760	4800-2880	3200-1920	2400-1440	1920-1150	1600-960	1370-820	1200-720	1060-640	960-575

Exemplo: h=0.5 m - R=7 mm/dia - $\frac{h}{R} = 570$ - $\frac{4}{R} = 145$

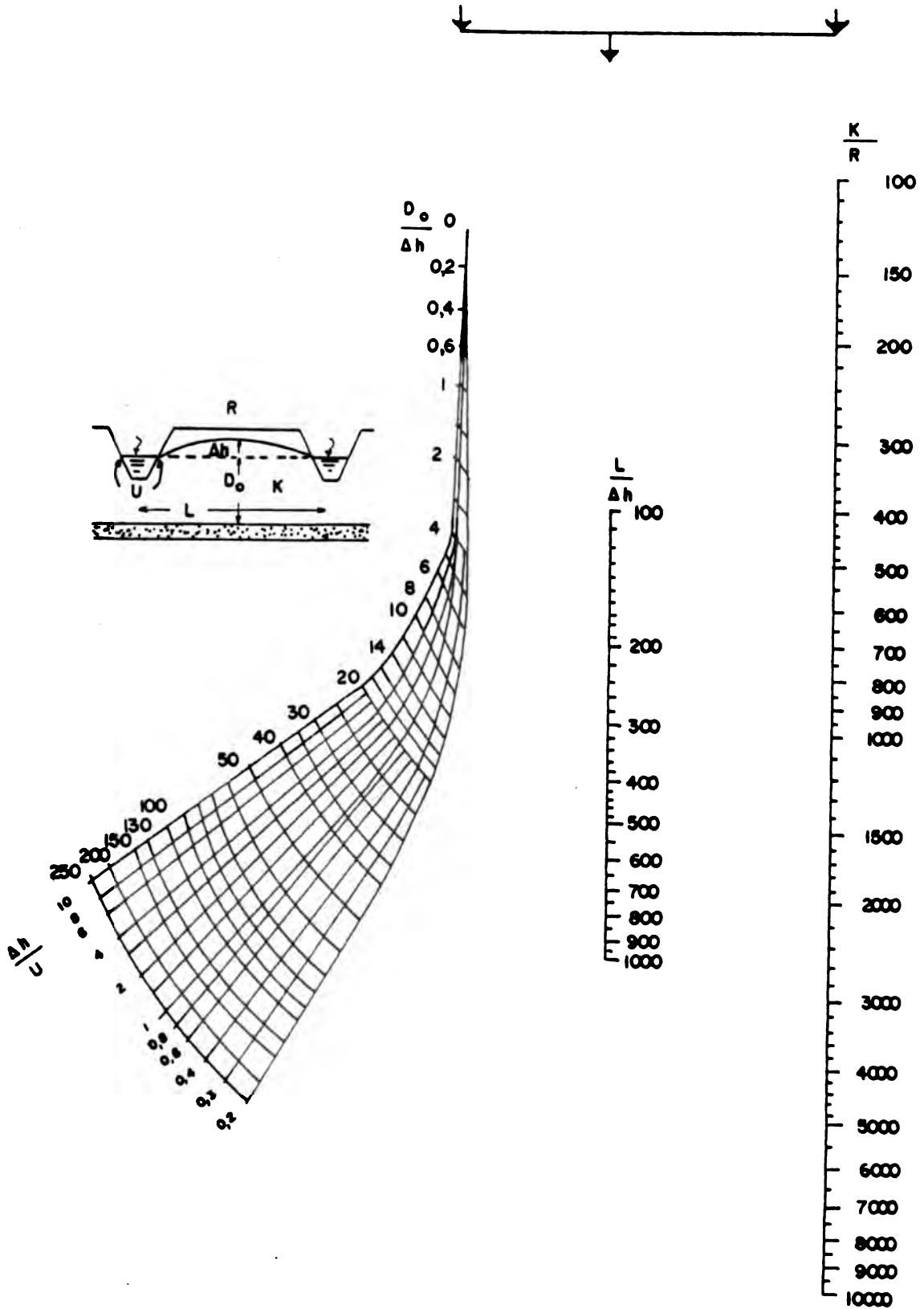
NOMOGRAMA X

Cálculo do espaçamento de valetas para solos homogêneos. $L/\Delta h < 100$
(Fórmula de Hooghoudt).





MONOGRAMA XI. Cálculo do espaçamento de valetas para solos homogêneos. $L/\Delta h > 100$ (Fórmula de Hooghoudt).



Para o caso de solos de duas camadas, Bouman confeccionou os Nomogramas XII e XIII, dependendo se a relação $L'/\Delta h$ é maior ou menor que 100.

Procedimento:

a. Conhecendo D , Δh , u , K_1 , K_2 e R

Calcule:

$$D/\Delta h, \quad K_1/R, \quad K_2/R \quad \text{e} \quad \Delta h/u$$

b. Obtenha o ponto de intersecção com os valores de $D/\Delta h$ e $\Delta h/u$

c. Mediante reta junte o ponto obtido em (b) com o valor de K_2/R , obtendo um valor X no eixo $L'/\Delta h$

d. Mediante reta junte o valor $L'/\Delta h$ obtido em (c) com o valor de K_1/R e obtenha o valor de "a"

e. Logo calcule $L = a \times L'$

Exemplo:

a. $K_1 = 10$ m/dia;

$K_2 = 2$ m/dia;

$R = 0,01$ m/dia

$u = 1,25$ m;

$\Delta h = 0,5$ m;

$D = 8$ m

Cálculos:

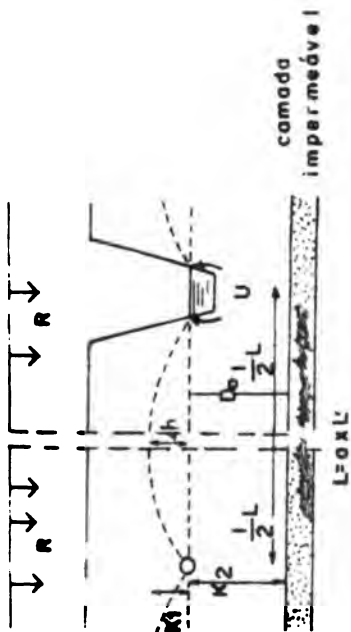
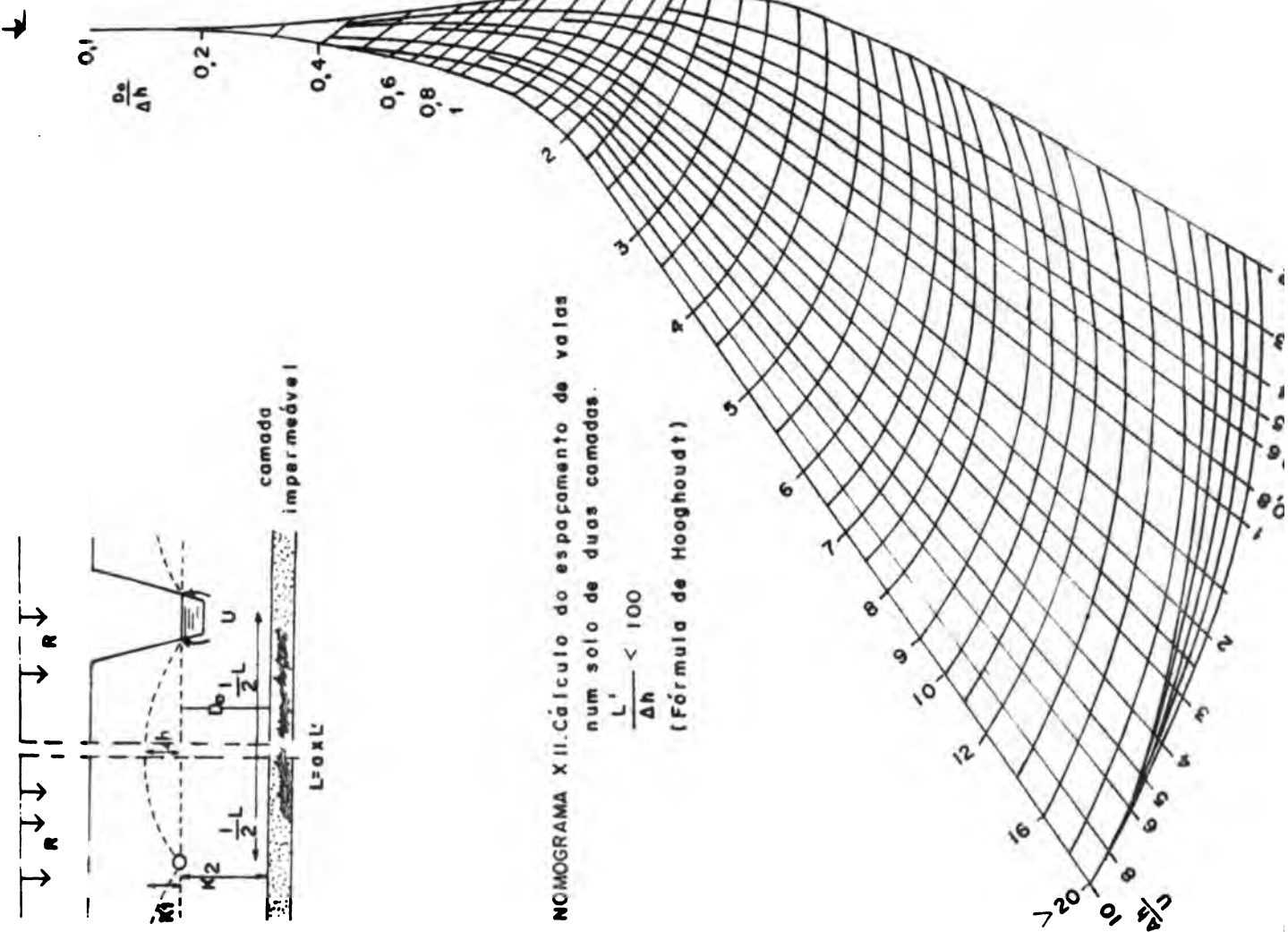
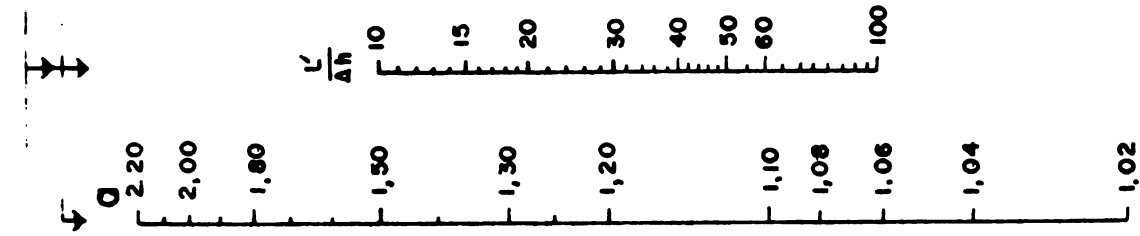
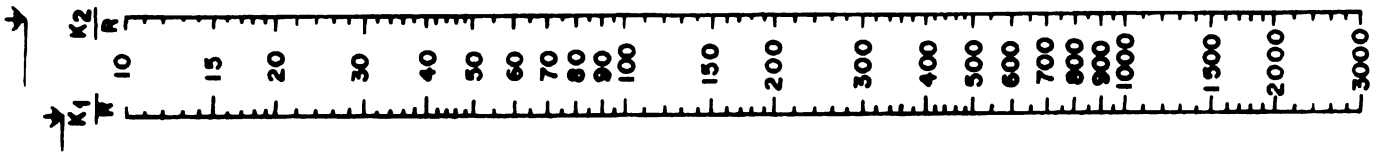
$$\frac{K_1}{R} = 1000, \quad \frac{K_2}{R} = 200, \quad \frac{\Delta h}{u} = 0,4, \quad \frac{D}{\Delta h} = 16$$

b. Traçando reta entre ponto ($D/\Delta h$, $\Delta h/u$) e K_2/R obtém-se $L'/\Delta h = 130$ (Nomograma XIII)

c. Traçando reta com os valores de $L'/\Delta h = 130$ e K_1/R obtém-se o valor $a = 1,11$

d. $L'/\Delta h = 130 \rightarrow L' = 130 \times 0,5 = 65$ m

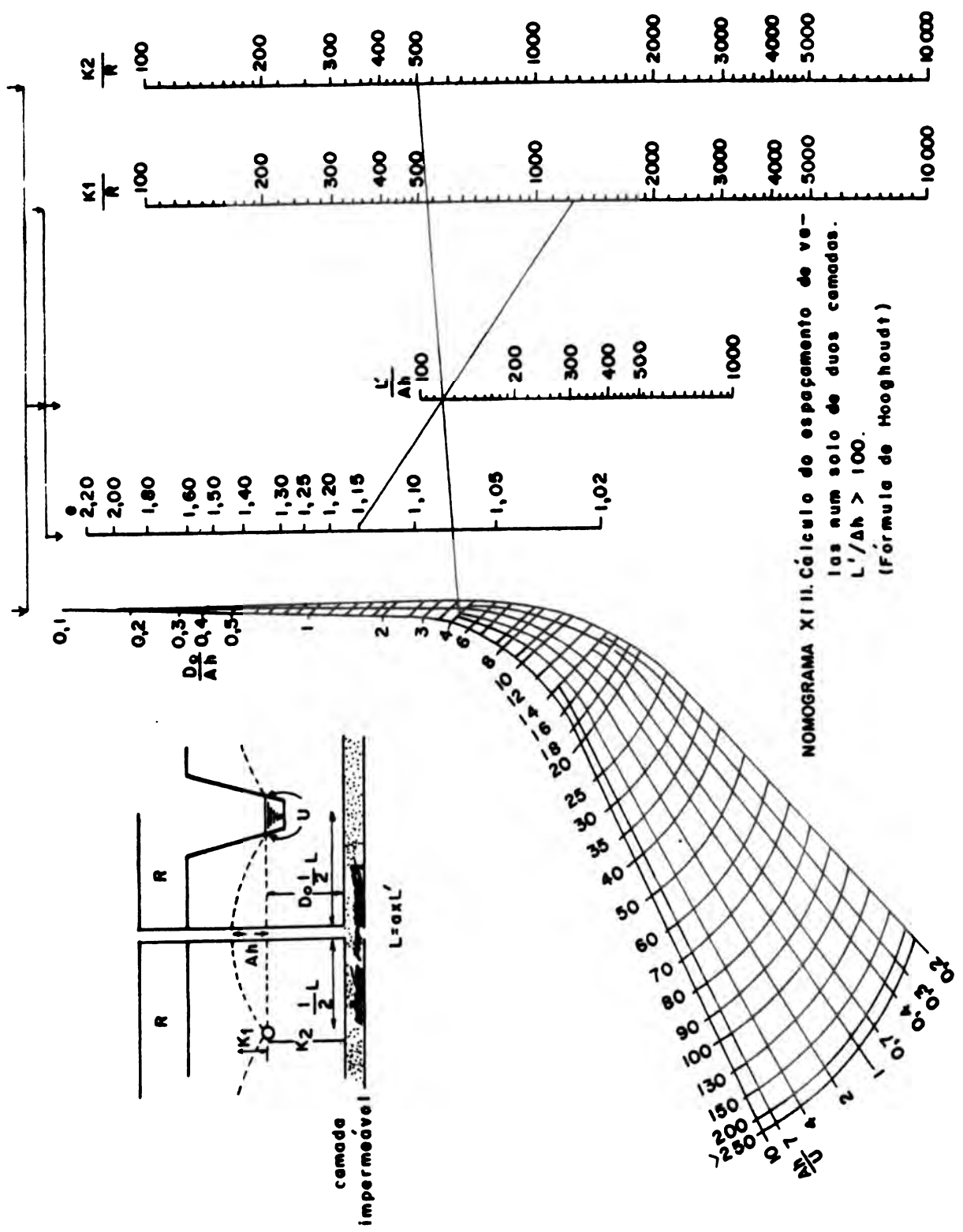
$$\text{Logo } L = a \times L' = 1,11 \times 65 = 72 \text{ m}$$



NOMOGRAMA X II. Cálculo do espaçamento de valas num solo de duas camadas.

$$\frac{L'}{\Delta h} < 100$$

(Fórmula de Hooghoudt)



NOMOGRAMA XIII. Cálculo do espaçamento de duas camadas de impermeável com $L'/Ah > 100$.
(Fórmula de Hooghoudt)

9.3. Fórmula de Ernst

Geralmente, a solução dada por Hooghoudt não pode ser aplicada no caso do solo consistir de 2 ou mais camadas e/ou se o dreno estiver situado sobre a interfase destas camadas.

O princípio geral consiste em dividir a carga total em 3 componentes.

$$h = h_h + h_v + h_r \quad 9.9$$

onde

h : perda total da carga hidráulica (m)

h_h : perda da carga hidráulica devido ao componente do fluxo horizontal (m)

h_v : perda da carga hidráulica devido ao componente do fluxo vertical (m)

h_r : perda da carga hidráulica devido ao componente do fluxo radial (m)

A fórmula de Ernst, é a seguinte:

$$h = \frac{R D_v}{K_1} + \frac{R L^2}{8 \sum K D} + \frac{R L}{\pi K_2} \ln \frac{D_r}{P} \quad 9.10$$

Componentes: Vert. Horizon. Radial

onde

R : descarga normativa (m/dia)

D_v : distância vertical entre o nível do ponto médio do lençol freático entre os drenos e o fundo destes (m)

K_1 : condutividade hidráulica do estrato superficial (m/dia)

L : espaçamento dos drenos (m)

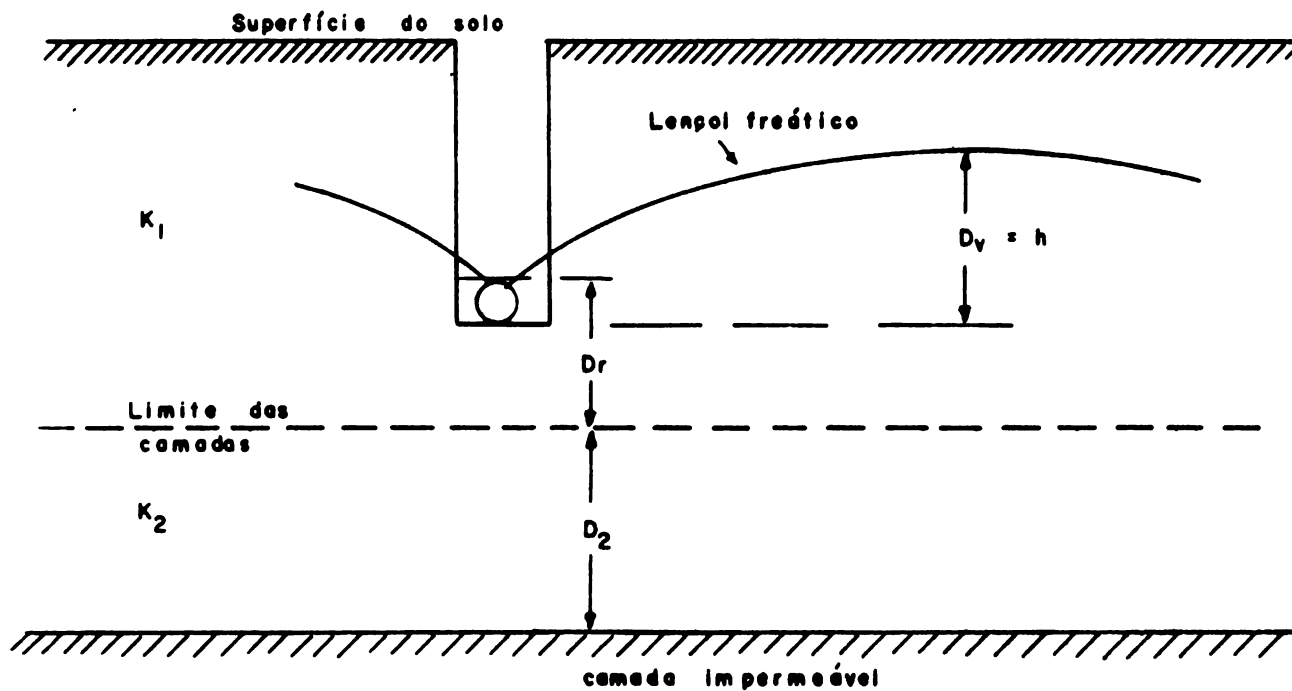
$D_1, D_2 \dots D_n$: espessura das camadas com diferentes condutividades hidráulicas (m)

$K_1, K_2 \dots K_n$: condutividade hidráulica dos diferentes estratos (m/dia)

D_r : espessura do estrato onde ocorre o fluxo radial

P : perímetro molhado da vala aterrada que é igual à largura da base (b) mais 4 vezes o raio externo do tubo

$$P = b + 4 r_o$$

EsquemaCasos especiais da fórmula de Ernst

A. Quando $D > \frac{1}{4} L$ (Nomograma XIV)

$$h = \frac{RL}{\pi K} \ln \frac{L}{u}$$

9.11

u: perímetro molhado

Utilizar o Nomograma XIV para sua resolução

Exemplo:

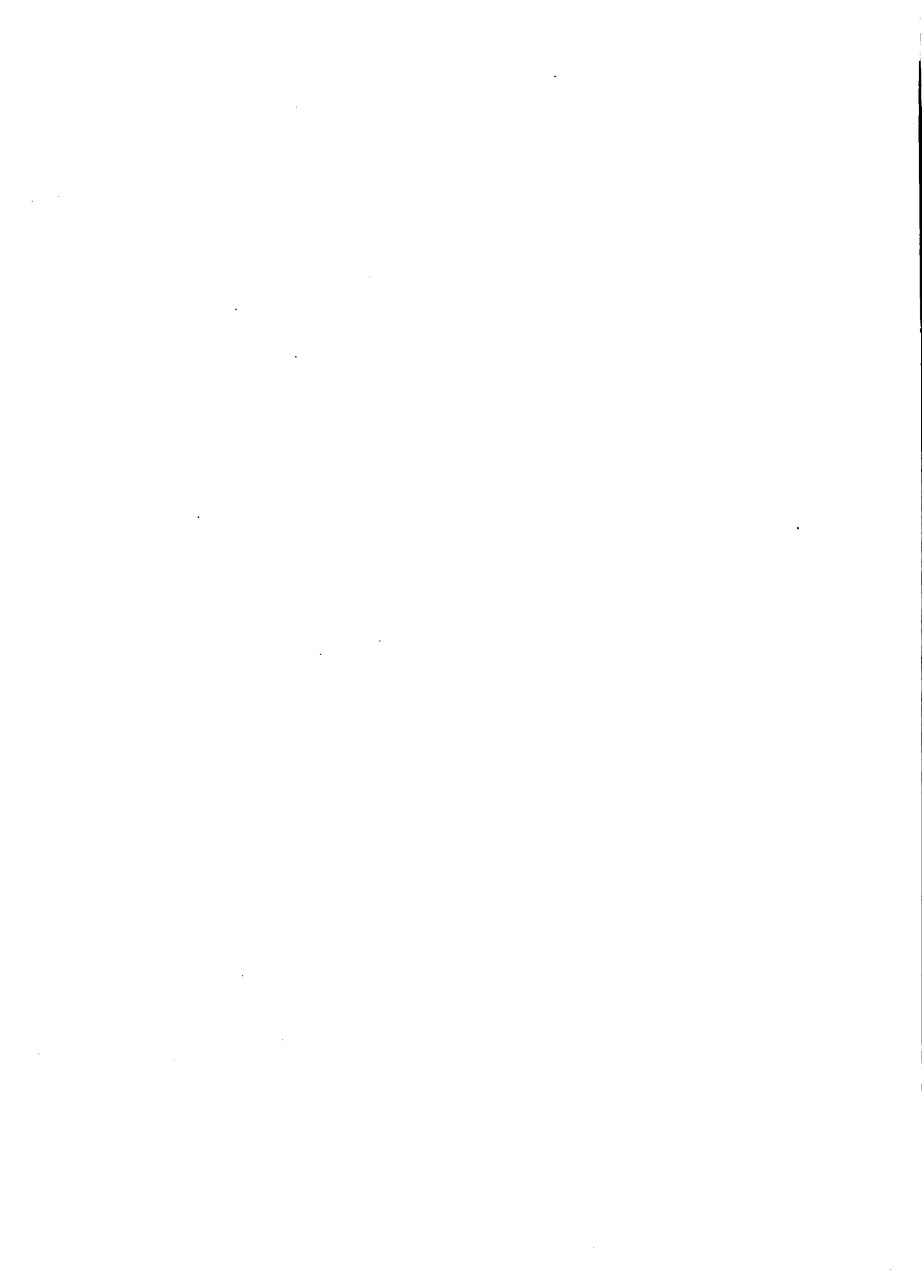
$$R = 2 \text{ mm/dia}$$

$$h = 1,20 \text{ m}$$

$$K = 0,8 \text{ m/dia}$$

$$u = 1,5 \text{ m}$$

$$\frac{h}{R} = \frac{1,2}{0,002} = 600$$



Procedimento:

- Unir o ponto 600 na escala direita ($\frac{h}{K}$) com K (linha a)
- Determinar a intersecção da linha a com a vertical $L \ln \frac{L}{u}$ (Ponto b)
- Pelo ponto b, traçar uma linha horizontal e interceptar à esquerda ou direita o valor de u
- Veja na escala horizontal L o espaçamento dos drenos (m)

$$\text{Para } u = 1,50 \text{ m,} \quad L = 280 \text{ m}$$

- B. Quando $D < \frac{1}{4} L$ (Nomograma XV)

$$h = \frac{RL^2}{8KD} + \frac{RL}{\pi K} \ln \frac{D_0}{u}$$

9.12

Utilizar o Nomograma XV

Exemplo: igual ao anterior:

Utilizar $D_0 = 9 \text{ m}$

Dados a usar no Nomograma

a. $KD = 0,8 \times 9 = 7,2 \text{ m}$

b. $R_r = \frac{1}{\pi K} \ln \frac{D_0}{u}$ (calcular com a escala ao pé do gráfico)

$$\frac{D}{u} = \frac{9}{1,5} = 6,0$$

$$\frac{1}{\pi} \ln \frac{D_0}{u} = 0,57 \text{ (Escala)}$$

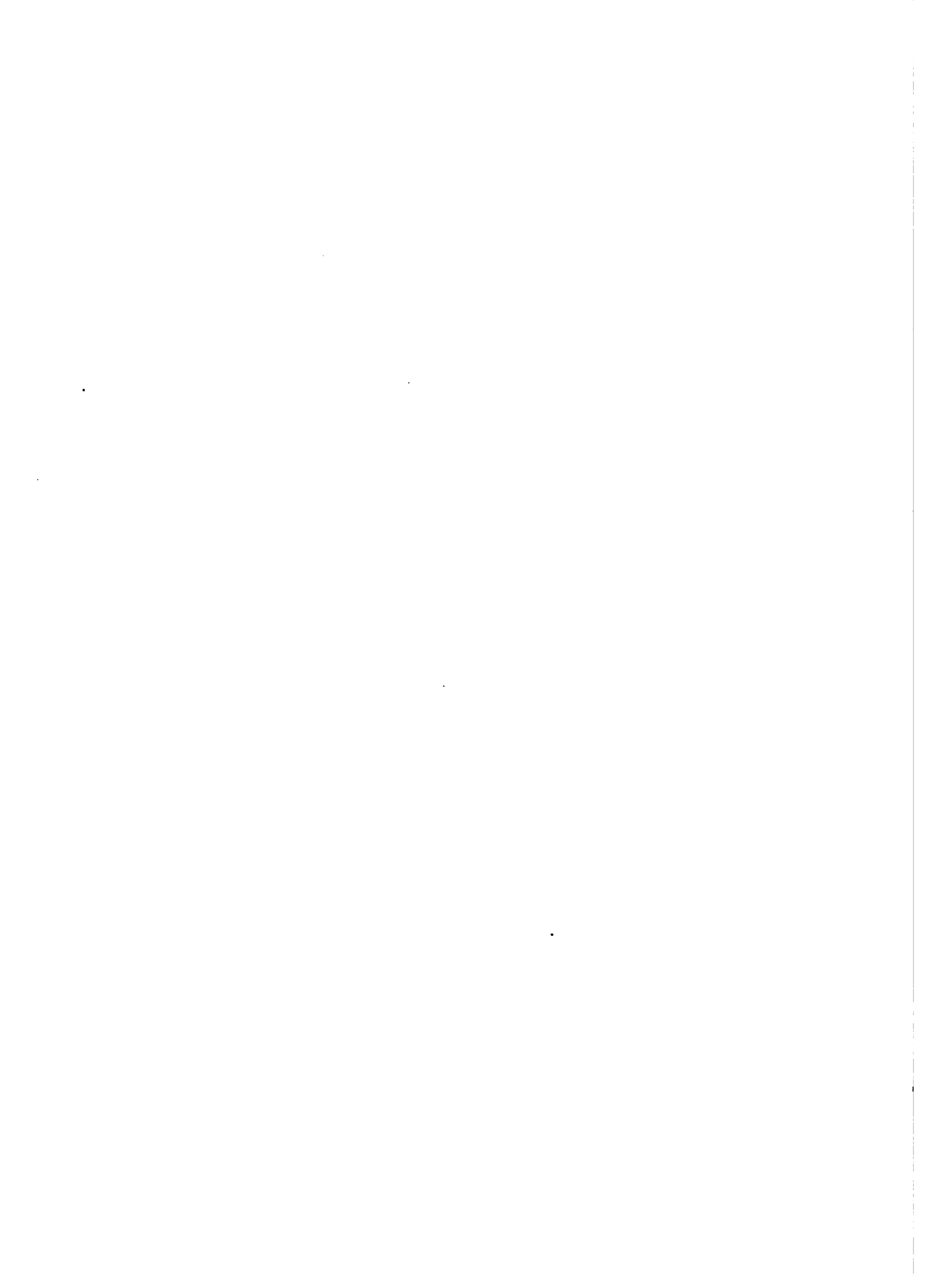
$$R_r = \frac{0,57}{K} = \frac{0,57}{0,8} = 0,71$$

c. $\frac{h}{K} = \frac{1,2}{0,002} = 600$

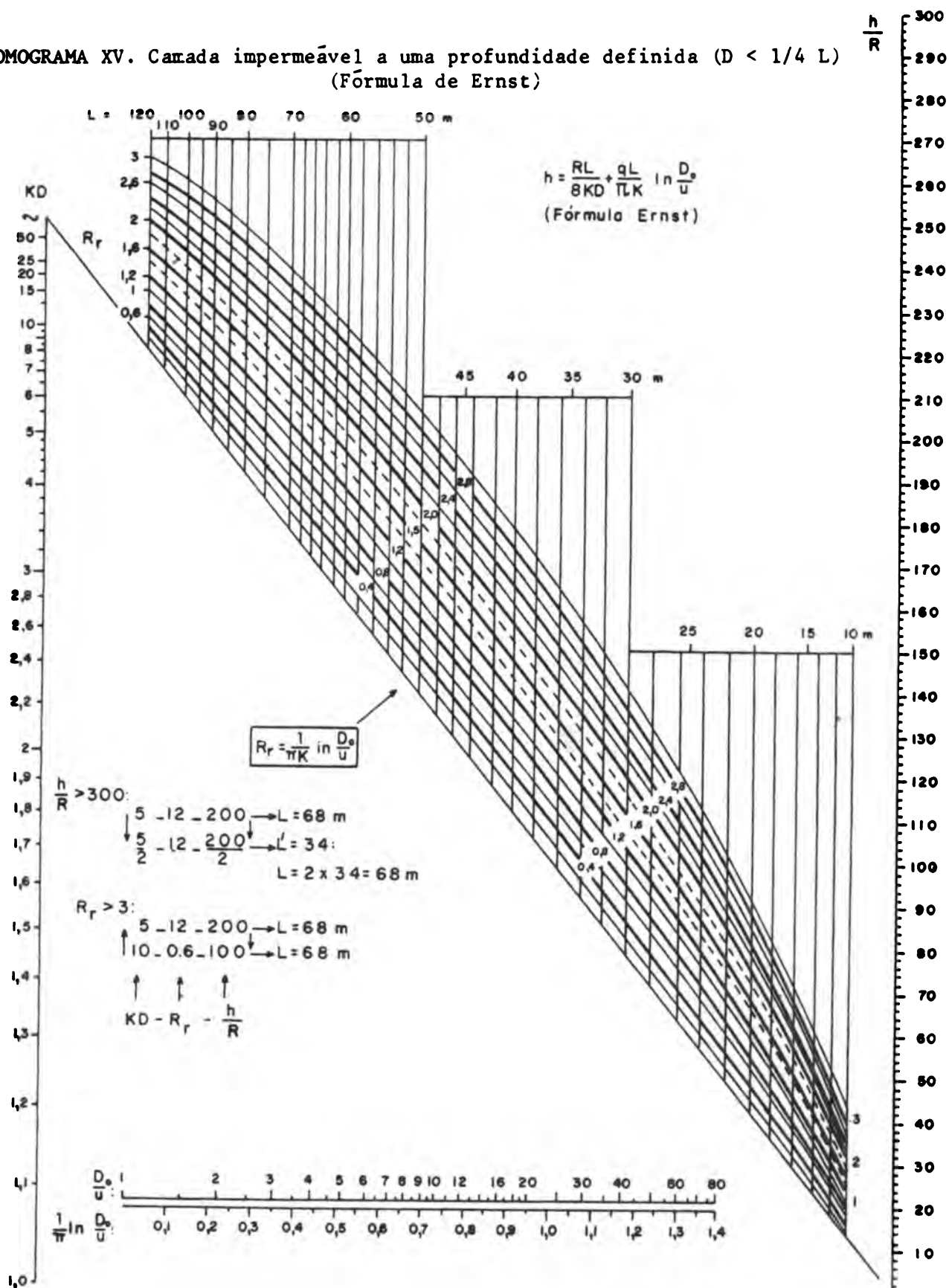
Resumo:

	KD	R_r	$\frac{h}{K}$	
	7,2	0,71	600	→ L
Usar	3,6	0,71	300	→ L'

$L = 2L'$



NOMOGRAMA XV. Camada impermeável a uma profundidade definida ($D < 1/4 L$)
(Fórmula de Ernst)



O procedimento é semelhante ao caso anterior.

- Unir o valor $\frac{h}{R}$ com o valor KD
- Interceptar horizontalmente o valor de R_T
- Ler L na escala horizontal

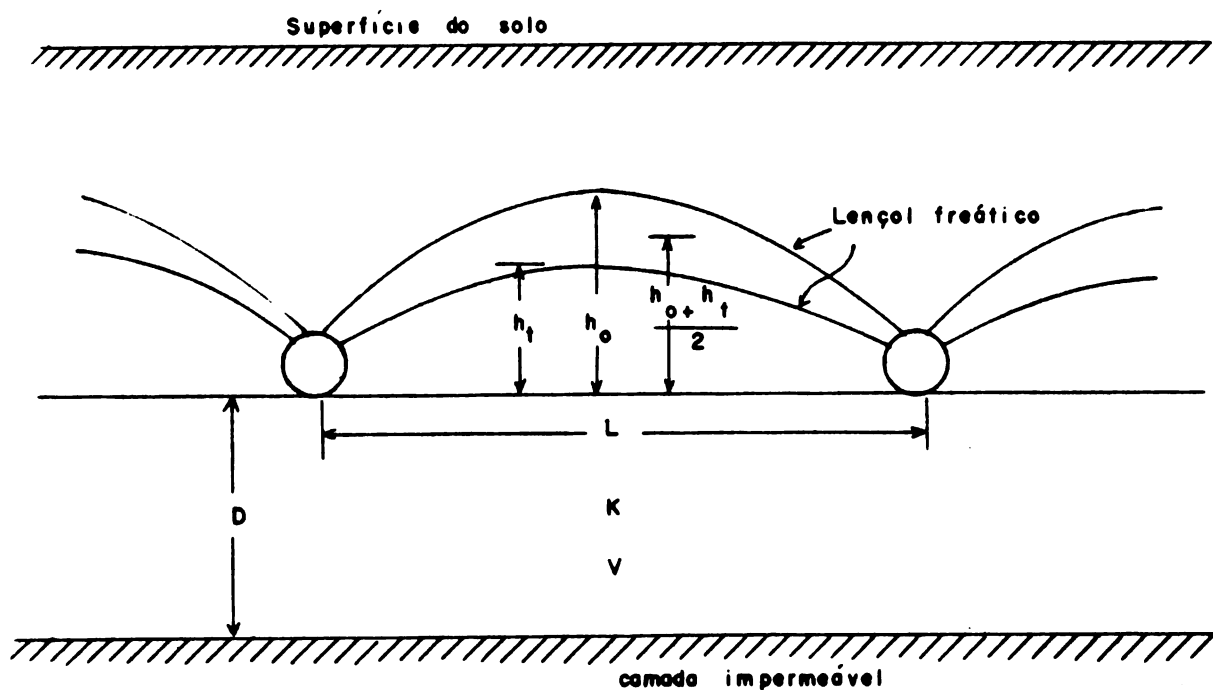
Em nosso exemplo $L' = 84$ m

Logo $L = 2L' = 168$ m

9.4. Fórmula de Glover Dumm

Esta fórmula está baseada numa situação de fluxo não permanente.

Esta equação é particularmente útil quando nos deparamos com problemas de drenagem ligados a irrigação. A recarga não é permanente já que ocorre a intervalos que são determinados pela frequência de irrigação.



Fórmula:

$$L^2 = \frac{\pi^2 KD \cdot t}{V \cdot \ln\left(1,16 \frac{h_o}{h_t}\right)}$$

onde,

L: espaçamento dos drenos (m)

K: condutividade hidráulica (m/dia)

D: espessura do estrato onde há fluxo horizontal (m)

V: fração drenável do espaço poroso

h_o : altura do lençol freático sobre o fundo do dreno antes da descida da água (m)

h_t : altura do lençol freático sobre o fundo do dreno depois da descida da água (m)

t: tempo em que ocorre a descida do lençol freático (dias)

O estrato D está em função de d (estrato equivalente), h_t e h_o , pela relação

$$D = d + \frac{h_o + h_t}{4} \quad 9.14$$

O valor de d depende de L, r_o e D, para o seu cálculo, utilizam-se as mesmas fórmulas e tabelas que para a fórmula de Hooghoudt.

Exemplo:

Numa área irrigada o lençol freático se eleva até 0,5 m sob a superfície, tão logo depois de irrigada.

Necessita-se que após 3 dias ($t = 3$) o lençol freático seja baixado novamente a 1,0 m sob a superfície mediante drenos de manilhas.

Outros dados:

Profundidade dos drenos = 1,8 m

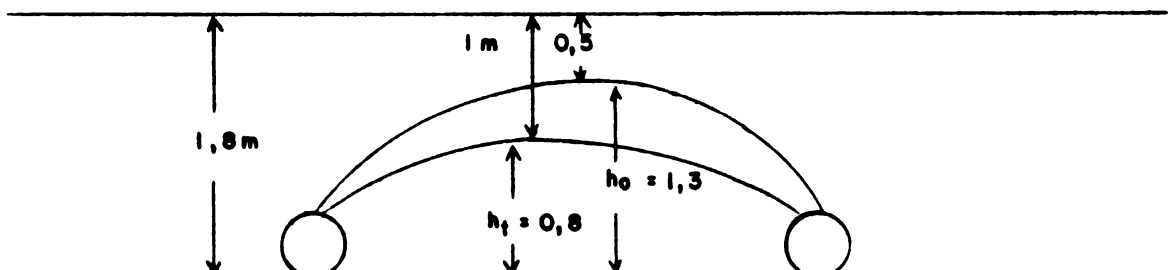
K = 0,8 m/dia

D_o = 5,0 m

V = 0,05 (quando desconhecido, pode-se estimar

$$\text{por } v = \sqrt{\frac{K}{100}}$$

r_o = 0,10 m

Esquema:

$$h_o = 1,8 - 0,5 = 1,3 \text{ m}$$

$$h_t = 1,8 - 1,0 = 0,8 \text{ m}$$

$$D = d + \frac{h_o + h_t}{4} = d + \frac{1,3 + 0,8}{4} = d + 0,525$$

$$L^2 = \frac{(3,14)^2 \times 0,8 \times (d + 0,525)}{0,05 \times 2,3 \log \left(1,16 \frac{1,3}{0,8}\right)} \times 3$$

$$L^2 = 743d + 390$$

Resolver por tentativa

d	L_{est}	L^2	L_{calc}
3,23	60	2789,9	52
3,0	<u>50</u>	2619	<u>51</u>

Neste caso por tratar-se de drenos de manilhas a resolução, além de por tentativa, pode ser feita utilizando o Nomograma IX de Hooghoudt.

9.5. Normas de drenagem

A formulação das normas de drenagem é o resultado do estudo de um grande número de informações, coletada durante o período de pesquisas para o diagnóstico do problema.

Como as normas de drenagem são características para cada problema de drenagem em particular, não é possível apresentar uma metodologia de formulação.

Exemplo:

A maneira de exemplo, apresenta-se a continuação as normas de drenagem formuladas para os setores 4 e 5 do Projeto de Irrigação de São Gonçalo, Paraíba, por participantes do II Curso de Drenagem de Terras Agrícolas, do Convênio IICA/MINTER, realizado em Petrolina, Pernambuco.

Características gerais dos setores 4 e 5

A área é formada por solos aluvionais, apresentando uma variação na textura, de arenoso, franco arenoso, franco a franco argiloso.

Os valores da condutividade hidráulica, medidos a uma profundidade de 0,5 a 1,5 m, variam de 0,2 a 6,0 m/dia com uma média de 1,7 m/dia.

Profundidade dos drenos

Em geral, uma profundidade crítica do lençol freático se pode fixar em 1,0 m para solos de textura média ou argilosa, e 0,8 para solos arenosos. Para os solos de textura média a argilosa, predominantes no primeiro 1,5 m do perfil de solo na área estudada, os drenos devem ter então uma profundidade de mais de 1,0 m.

De acordo à topografia da área, o fator limitante é o nível de saída dos drenos coletores ao coletor principal da área (Rio Piranhas). Devido a isto, sugeriu-se colocar os drenos a uma profundidade mínima possível tomando em consideração que a carga hidráulica sobre os drenos deveria ser a necessária para permitir fluxo aos drenos.

Fixando-se a carga hidráulica necessária em $h = 0,3$ a $0,4$ m, e considerando a profundidade crítica do lençol freático em 1 m, obteve-se uma profundidade dos drenos de 1,3-1,4 m.

Os drenos coletores devem ter uma profundidade sendo 0,3 m maior que

a profundidade dos drenos de campo, o qual indica que o dreno coletor devia ficar a 1,7 m de profundidade. Isto coincidia com a profundidade do coletor da área (DM3) e então a profundidade foi a adequada e constituia na norma de profundidade para a área.

Descarga normativa

Com a finalidade de fixar uma norma de descarga dos drenos, é necessário estimar em condições de campo a relação entre a descarga normativa (R em m/dia) e a profundidade do lençol freático (G, em metros).

A respeito, não existe experiência no Nordeste do Brasil, e baseado nos dados obtidos em anos anteriores estimou-se um balanço de água.

Em geral, tem-se:

$$R = P + S - N \quad (\text{m/dia})$$

onde

P: percolação da água de irrigação ou chuva

S: recarga subterrânea de água de áreas alheias

N: drenagem natural existente

A época crítica de drenagem no Município de Souza, corresponde aos meses de fevereiro, março e abril, com uma precipitação média de 0,18 m/mes ou seja, 0,006 m/dia. Desta quantidade estimou-se que 50% é evaporada ou sai por escoamento superficial, com o qual tem-se em média uma recarga por percolação de $P = 0,003$ m/dia. Nos dias com chuvas intensas a recarga por percolação será mais elevada. Neste caso o lençol freático chegará perto da superfície e a descarga dos drenos aumentará proporcionalmente.

A recarga subterrânea nos setores 4 e 5 do Projeto parece de pouca importância.

Em equilíbrio com a evaporação, e sem irrigação, uma recarga subterrânea de 0,002 m/dia corresponderia a uma profundidade do lençol freático de aproximadamente 1,0 m por baixo da superfície do terreno.

Aplicando irrigação, o lençol freático deveria estar mais elevado. Devido a isto, considera-se uma recarga subterrânea somente para áreas onde o lençol está mais perto da superfície que 0,5 m.

De todas estas considerações, do regime pluviométrico e das águas subterrâneas, tentativamente propôs-se o balanço de água seguinte, para diferentes profundidades do lençol freático.

Profundidade do lençol G (m)	Recargas sub terrâneas S (m/dia)	Drenagem Natural N(m/dia)	Percolação (+) P (m/dia)	Recarga R(m/dia)
0 - 0,5	0,002	0,000	0,003	0,005
0,5 - 1,0	0,000	0,000	0,003	0,003
1,0 - 1,5	0,000	0,002	0,003	0,001
1,5 - 2,0	0,000	0,004	0,003	-

Da análise anterior deduz-se a necessidade de se pesquisar as situações das Normas de drenagem e espaçamento dos drenos em áreas pilotos, especialmente quando se pretende implantar um sistema de drenagem que representa uma elevada inversão.

10. DELINEAMENTO DO SISTEMA DE DRENAGEM

A finalidade de um estudo de drenagem e das pesquisas básicas é a implantação de um sistema de drenagem. Para isto, é necessário fazer um delineamento do sistema.

Neste capítulo abordaremos o delineamento de um sistema de drenagem a nível de parcela.

Em um sistema de drenagem a nível de parcela podem utilizar-se valas ou drenos subterrâneos, e os dois métodos têm vantagens e desvantagens.

As valas têm a dupla finalidade de coletar e remover as águas de drenagem sejam superficiais ou subterrâneas. Devido a esta diferença, as valas são mais favoráveis no caso que o campo precise também de drenagem superficial, como é o caso de solos de baixa permeabilidade ou em zonas de alta precipitação e excedentes de irrigação. Uma grande desvantagem das valas é a perda de área que em solos de alto valor econômico e com culturas intensivas têm muita importância.

A vantagem de drenos subterrâneos é a de facilitar as operações de transporte e mecanização, evitando a construção de pontes, boeiros e outras estruturas necessárias no caso de utilização de valas abertas.

10.1. Sistemas de delineamento

Os diferentes métodos de drenagem, os diferentes tipos de drenagem, a topografia da área, as variações das características dos solos e das culturas, tornam complexa a discussão de um sistema de delineamento.

Em forma muito geral, poderíamos classificar os sistemas nos seguintes tipos.

- a. Natural. O sistema natural é amplamente adotado nos terrenos que não precisam de drenagem completa com um espaçamento de drenos definido (Figura 10.1).
A drenagem é feita aproveitando os desníveis topográficos.
- b. Simples. Chama-se assim ao sistema em que cada linha de drenagem (vala ou tubo) tem saída direta ao coletor. Este sistema é utilizado em áreas planas onde não há muita declividade.

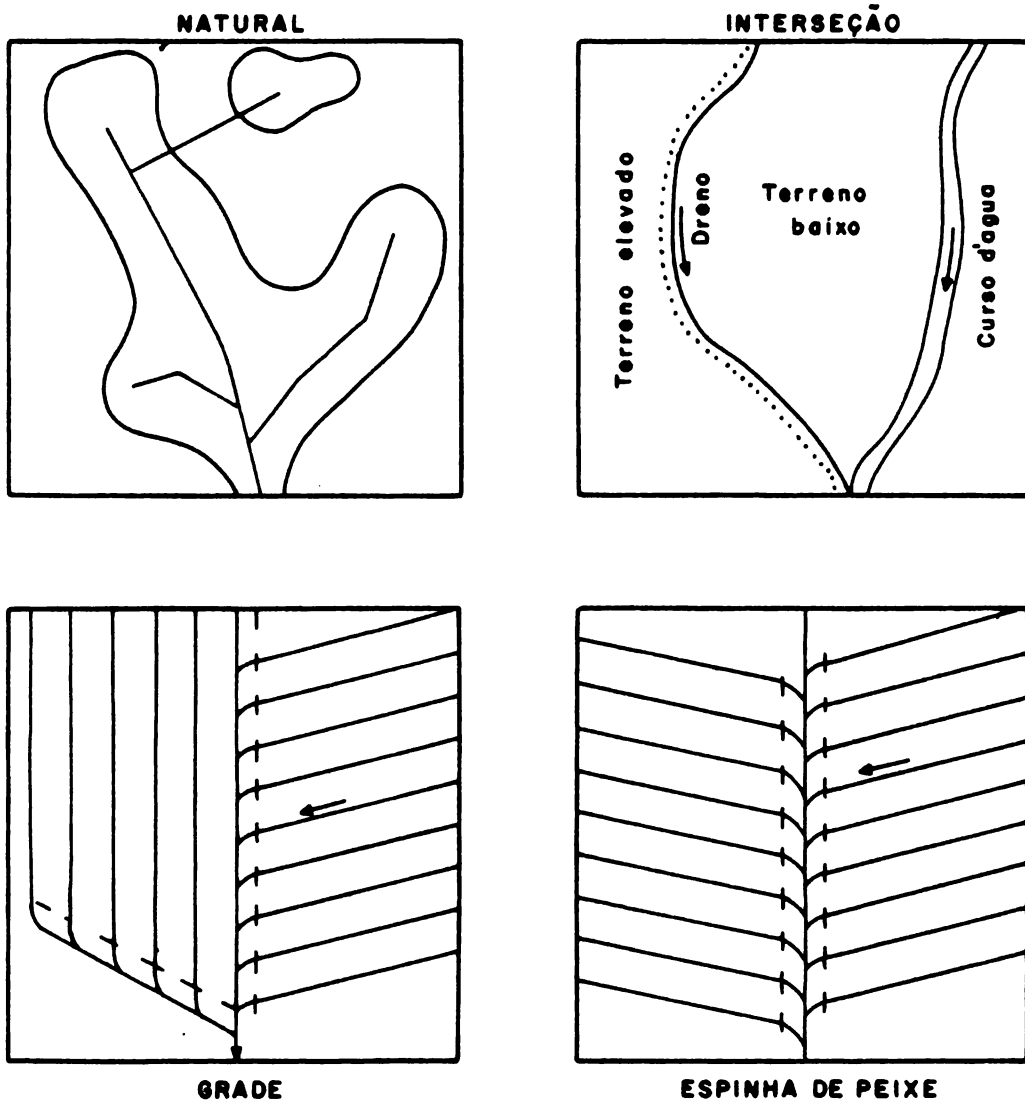


Figura 10.1. Alguns sistemas de drenagem

c. Compostos. São os sistemas de drenos em que cada linha de drenagem (vala ou tubo) deságua numa outra linha de dimensão maior.

Neste sistema, podem-se ter sistemas paralelos ou de espinha de peixe dependendo das características topográficas.

d. Interseção. Sistema que tem por função extrair a água proveniente de fontes externas antes que cheguem às zonas mais baixas.

Na Figura 10.1 mostram-se alguns tipos de sistemas. A modalidade a adotar vai depender principalmente da topografia da área e da viabilidade agroecônômica da área.

10.2. Delimitação de um sistema de drenos abertos (valas)

Uma vez definidas as normas de drenagem para um sistema, capacidade de descarga e profundidade do lençol, proceder-se-á seu dimensionamento. O gradiente hidráulico dos drenos é escolhido em relação à declividade disponível na área. Para diminuir a capacidade dos drenos é necessário aproveitar ao máximo a declividade só tendo em consideração as limitantes de velocidades permissíveis.

Dimensionamento das valas

a. Vazão

A quantidade de água ou vazão (Q) que uma vala pode transportar depende de sua seção transversal (A) e da velocidade da água na mesma (V), de acordo à seguinte relação:

$$Q = A \cdot V \quad 10.1$$

A velocidade da água diminui com a rugosidade das paredes (n), aumentando com a raiz quadrada da declividade do canal ($S^{1/2}$) e com uma potência do raio hidráulico (R).

$$R = \frac{\text{Área molhada}}{\text{Perímetro molhado}} = \frac{A}{P}$$

Para o cálculo da velocidade utiliza-se a fórmula de Manning

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad 10.2$$

e logo, a vazão pela relação

$$Q = A \cdot V = \frac{A}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad 10.3$$

onde

v: velocidade média (m/seg)

Q: vazão de descarga (m³/seg)

A: seção transversal da área molhada (m²)

n: coeficiente de rugosidade

R: raio hidráulico

S: declividade do canal (m/m)

O raio hidráulico pode determinar-se através das seguintes relações:
(Vide esquema no Nomograma XVI).

$$R = \frac{A}{P}$$

onde

$$A = bd + Zd^2 \quad 10.4$$

$$P = b + 2d \sqrt{Z^2 + 1}$$

Z é a projeção horizontal sobre a projeção vertical conhecida como a relação de talude (Z:1).

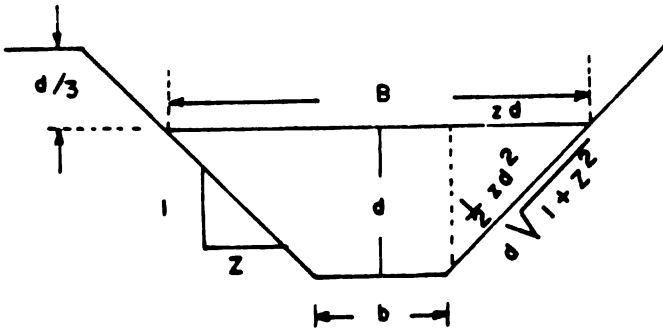
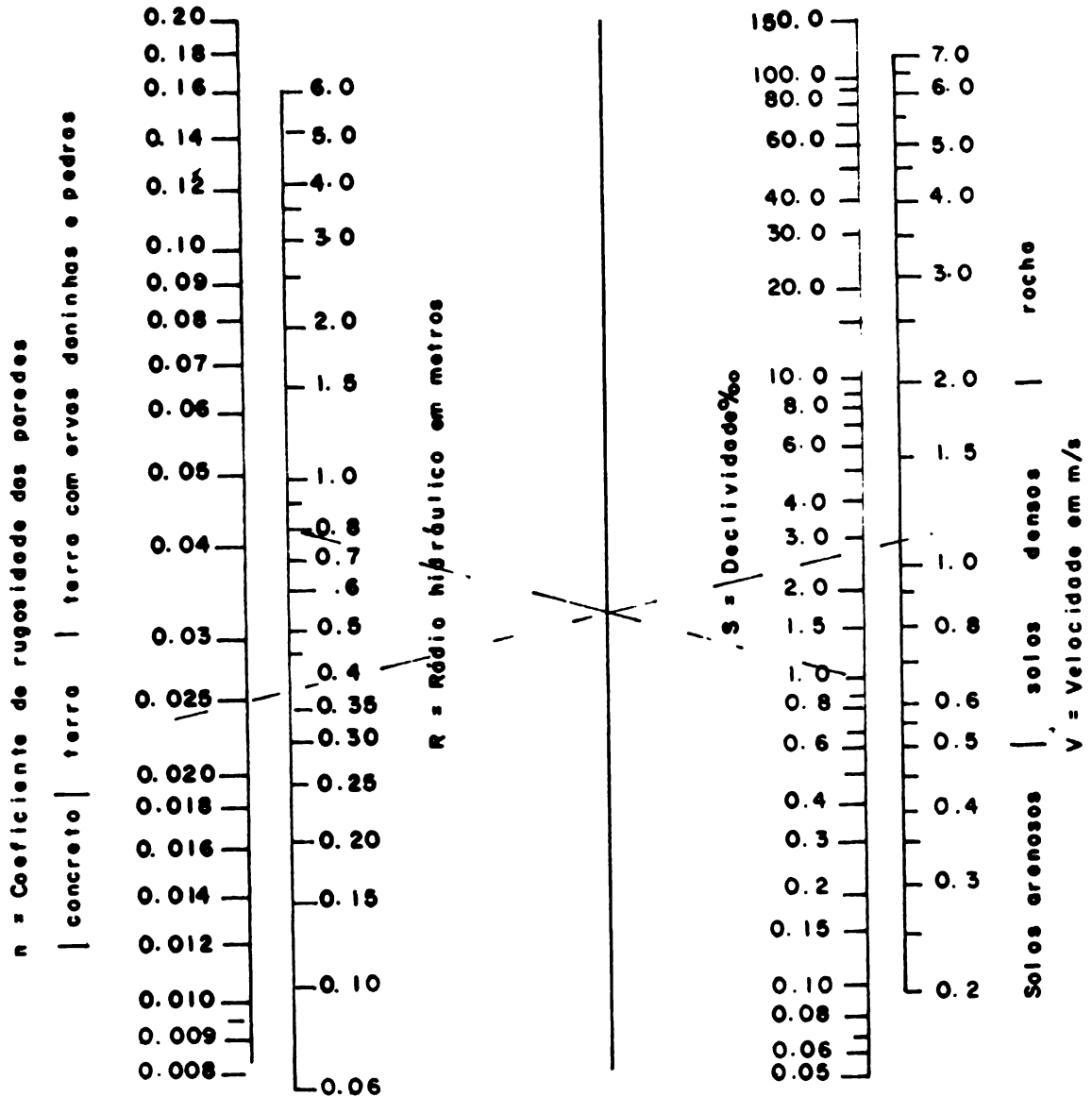
A velocidade pode ser calculada por tentativa mediante a utilização das relações anteriores, ou pode ser resolvida mediante o Nomograma XVI. Para utilizar o Nomograma XVI se requer conhecer R, n e S. Mediante reta juntam-se os valores de R e S. Logo junta-se o ponto interceptado no eixo com o valor de n na escala da esquerda. A prolongação da reta dá o valor V ao interceptar a escala da extrema direita.

b. Velocidades máximas permissíveis

Uma alta velocidade de descarga tem vantagem porque pode-se reduzir a seção transversal das valas. Com a finalidade de evitar a erosão, a velocidade da água não deve exceder certos valores máximos, os quais dependem do solo. No Quadro 10.1 mostram-se as velocidades máximas permissíveis em canais. Os valores correspondentes à coluna (b) têm aplicação à maioria das valas de drenagem.

NOMOGRAMA XVI. Resolução da Fôrmla de Manning

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} s^{1/2}$$



Z = Valor da projeção horizontal da parede do canal quando a projeção vertical é igual a 1
 Área = $A = bd + zd^2$
 Perímetro molhado = $P = b + 2d \sqrt{z^2 + 1}$
 Rdio hidrúlico = $R = \frac{bd + zd^2}{b + 2d \sqrt{z^2 + 1}}$
 Largura = $B = b + 2dz$

Exemplo: Conhecidos $R = 0,8m$, $S = 1,0\%$ $n = 0,025$

Procurar V
 Resultado: $V = 11$ m/s



QUADRO 10.1. Velocidades permissíveis em canais

Material	Velocidades permissíveis (m/seg) segundo o material transportado pela água		
	Água limpa (a)	Transporte de limo co- loidal (b)	Transporte de limos não co- loidais, areia e fragmentos de rocha (c)
	m/seg	m/seg	m/seg
Areia fina (não coloidal)	0,45	0,75	0,45
Franco arenoso (não coloidal)	0,50	0,75	0,60
Franco limoso (não coloidal)	0,60	0,90	0,69
Limos aluviais (não coloidal)	0,60	1,10	0,60
Franco arenoso firme	0,75	1,10	0,70
Cinzas volcânicas	0,75	1,10	0,60
Seixo fino	0,75	1,50	1,15
Argila firme (coloidal)	1,15	1,50	0,90
Franco ou cascalho bem proporcionado	1,15	1,50	1,50
Limos aluviais (coloidais)	1,15	1,50	0,90
Limoso ou cascalho bem proporcionado	1,20	1,70	1,50
Cascalho grosso	1,20	1,80	1,95
Pedras arredondadas	1,50	1,70	1,95

Coefficiente de rugosidade e taludes

O coeficiente de rugosidade depende principalmente das condições de limpeza da vala. No Quadro 10.2 mostram-se alguns valores de coeficientes de rugosidade.

QUADRO 10.2. Coeficiente de rugosidade (n) para usar com a fórmula de Manning

Condições da vala	Valor de n
Valas muito limpas	0,022 - 0,030
Valas limpas	0,029 - 0,050
Valas ligeiramente com vegetação	0,040 - 0,067
Valas com vegetação	0,050 - 0,10
Valas com muita vegetação	0,067 - 0,20

A respeito dos taludes mais recomendáveis na construção das valas, sua eleição depende muito da natureza do solo. No Quadro 10.3 mostram-se os taludes mais recomendáveis para os diferentes tipos de material de escavação.

QUADRO 10.3. Taludes mais recomendáveis na construção de valas

<u>Material</u>	<u>Talude</u>
Argila e duripan	3/4:1
Argila com cascalho. Solos francos	1:1
Limo argiloso	1:1
Solos francos com cascalho	1 1/5:1
Solos franco-arenoso	2:1
Solos arenosos	3:1

10.3. Delineamento de um sistema de drenos subterrâneos

a. Vazão

Para os cálculos existem diferentes fórmulas sejam baseadas somente na função de transporte ou na função coletora das linhas de tubos. No último caso consideram-se os incrementos da descarga até a saída.

Num caso de um coletor, entre dois laterais, transporta uma quantidade de água que não varia de um lateral ao outro. Neste caso fala-se de fluxo constante. No caso de um dreno de campo, o fluxo muda desde o início do dreno até a entrada no coletor. Neste caso fala-se de fluxo não constante.

Mediante experimentação encontrou-se as seguintes relações para determinar a descarga.

Fluxo constante (tubos cheios)

a. Tubos lisos

$$Q = 50,7 d^{2,71} i^{0,57}$$

b. Tubos corrugados

$$Q = 21,8 d^{2,67} i^{0,50}$$

onde

Q: descarga em m³/seg

d: diâmetro dos tubos (m)

i: gradiente hidráulico (m/m)

Fluxo não constante (variado) (tubos cheios)

a. Tubos lisos

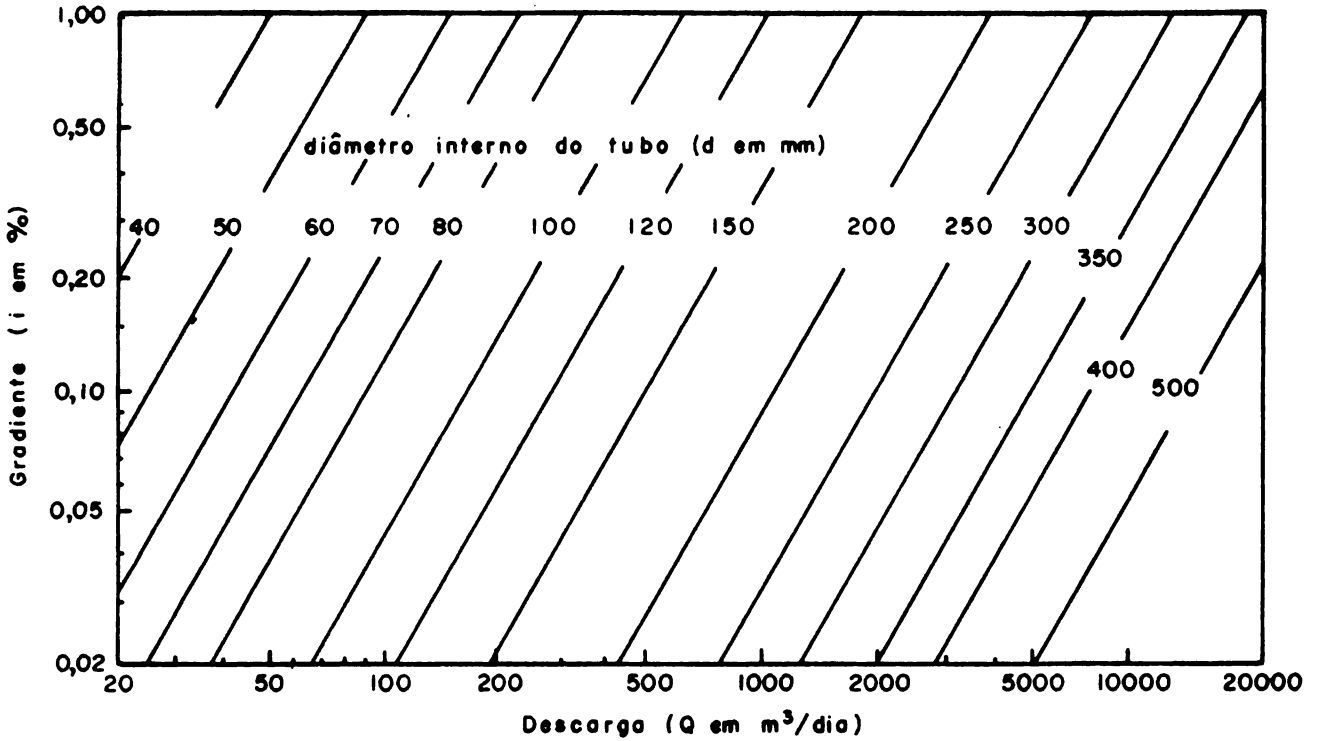
$$Q = 90 d^{2,71} i^{0,57}$$

b. Tubos corrugados

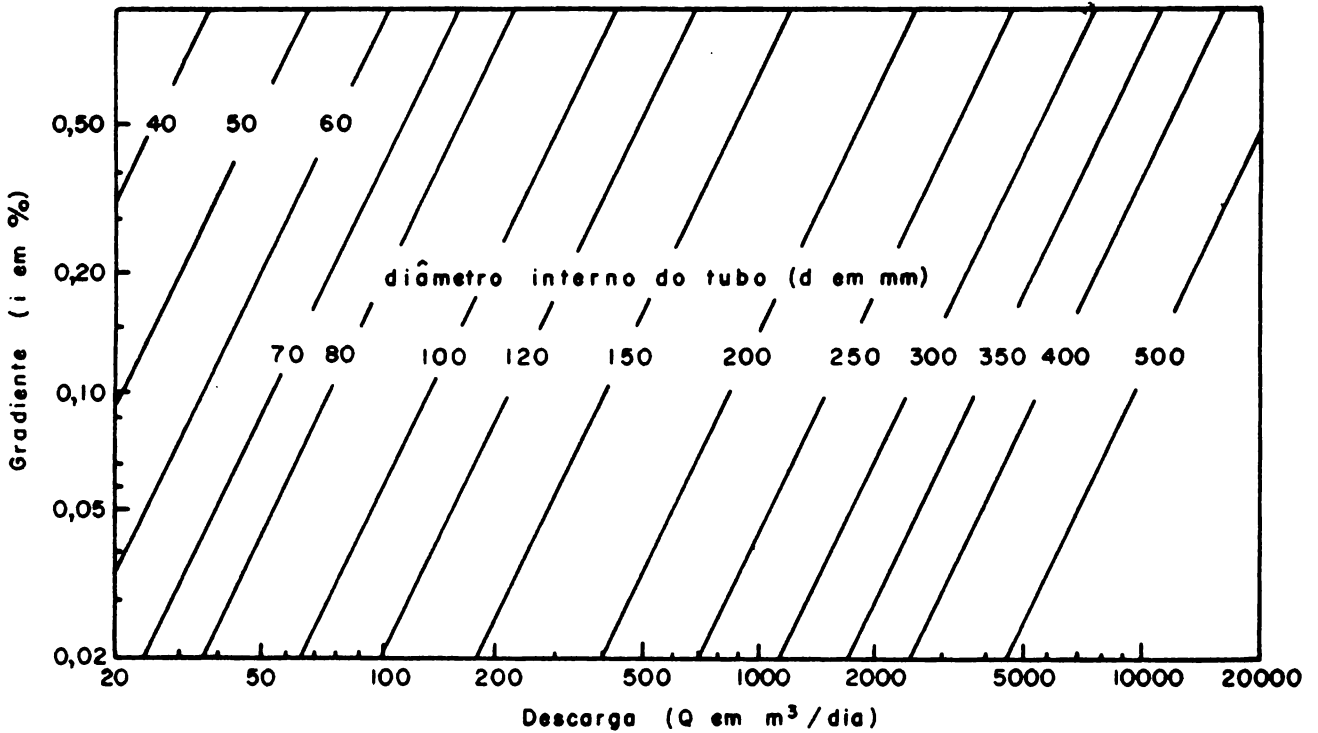
$$Q = 38 d^{2,67} i^{0,50}$$

As descargas, baseadas nestas fórmulas, podem ser calculadas mediante os Nomogramas XVII (Fluxo constante) e Nomograma XVIII (Fluxo variado)

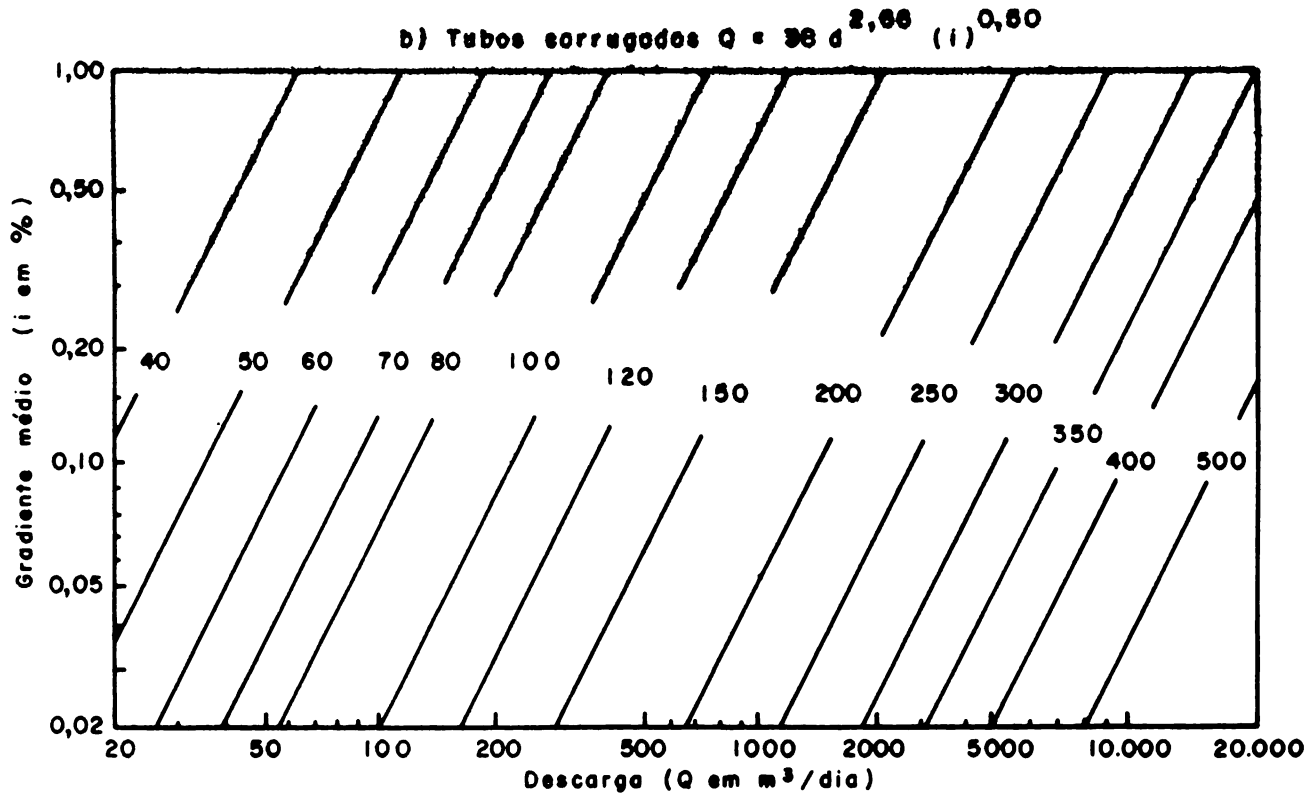
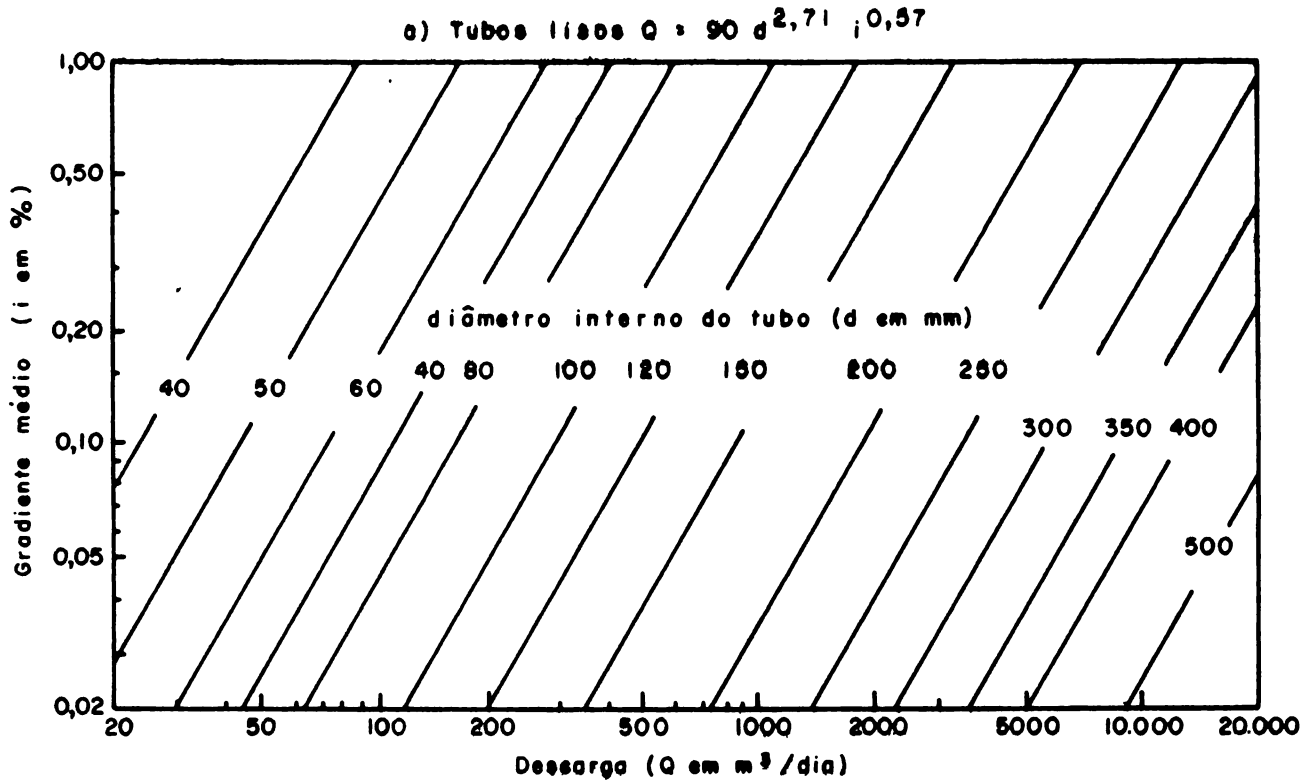
a) Tubos lisos - fórmula $Q = 50,7 \times d^{2,71} \times i^{0,57}$



b) Tubos corrugados - fórmula $Q = 21,8 \times d^{2,66} \times i^{0,50}$



NOMOGRAMA XVII - Determinação da capacidade de descarga em tubos cheios com fluxo constante.



NOMOGRAMA XVIII - Determinação da capacidade de descarga em tubos cheios com fluxo variado.



b. Diâmetro dos drenos

Os diâmetros dos tubos de drenagem dependem da quantidade de água que fluirá pelos tubos, o gradiente hidráulico (declividade), o tipo de fluxo (variado ou constante), e a rugosidade das paredes.

Para sua determinação existem equações e nomogramas.

Visser (1950), baseando-se na equação de Manning, derivou a seguinte relação para o cálculo do diâmetro dos tubos:

$$D = 0,0209 R^{0,375} A^{0,375} S^{-0,206}$$

onde

D: diâmetro dos tubos (m)

R: descarga normativa ou coeficiente de drenagem (m/dia)

A: área a drenar (m²)

S: declividade do terreno

O diâmetro mínimo mais recomendável para os drenos de manilhas é de 4" (10 cm). Na Holanda tem-se utilizado diâmetro até de 4 cm no caso de tubulações plásticas perfuradas.

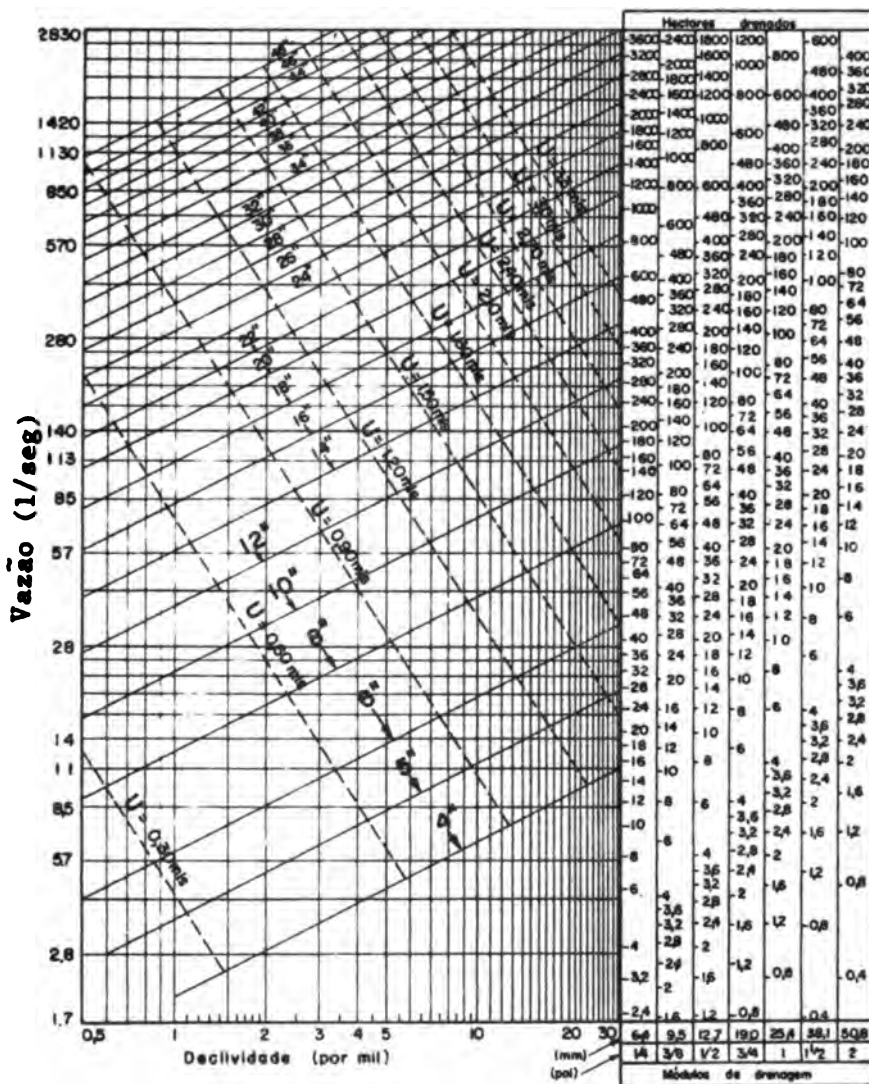
Para o cálculo do diâmetro de tubos coletores pode utilizar-se o Nomograma XIX de Yarnell e Woodward.

O uso do Nomograma XIX é feito da seguinte maneira:

- a. Selecionar a descarga normativa ou coeficiente de drenagem
- b. Procurar a superfície por drenar na coluna vertical do coeficiente escolhido
- c. Traçar uma linha horizontal que passe pelo valor encontrado em b
- d. Localizar o ponto de interseção desta horizontal com a linha vertical correspondente à declividade
- e. As linhas diagonais indicam os diâmetros superiores e inferiores que podem ser usados
- f. Prolongando a linha indicada em C até o extremo esquerdo leia a vazão máxima que o dreno coletor pode descarregar em l/seg

c. Declividade das linhas de tubos

A declividade deverá ser a maior possível para limitar o tamanho do



NOMOGRAMA XIX. Diagrama de Yarnell Woodard para determinar o diâmetro dos tubos coletores.

tubo.

As declividades mínimas recomendadas em manuais americanos são as seguintes:

<u>Diâmetro do tubo</u>	<u>Declividade mínima</u>
10 cm	0,10 %
12,5 cm	0,07 %
15 cm	0,05 %

Na Holanda os tubos de diâmetro pequeno, plásticos de 4 cm de diâmetro, são colocados geralmente com 0,10-0,15% de declividade mínima.

No caso de possível sedimentação deverá usar-se declividades que proporcionem velocidades mínimas de 0,50 m/seg.

d. Normas práticas para projetar um sistema

Os antecedentes reunidos nos estudos e pesquisas já indicados anteriormente permitirão projetar um sistema ou uma rede de drenagem que, em linhas gerais, deve observar os seguintes requisitos:

- a. Dispor de uma saída livre à atmosfera
- b. Em geral, é conveniente dispor de drenos laterais compridos e coletores curtos
- c. Os drenos laterais devem ser transversais à direção do fluxo da água freática
- d. Deve ser aproveitada toda a declividade disponível
- e. Dentro do possível o dreno coletor deve ser paralelo a rios e canais, especialmente em terrenos com desnível considerável.
- f. Todos os drenos devem ter uma declividade igual ao projetado com precisão de 1 cm. Isto é mais importante em baixas declividades
- g. Podem ser usados tubos de 4 polegadas até comprimentos de 350 metros; de 6 polegadas até 800 m e de 8 polegadas se são ainda mais compridos
- h. Os coletores devem ser calculados com o Nomograma XIX, e geralmente resultam de 8 polegadas ou mais de diâmetro.

Quando os coletores são de diâmetro muito grande podem ser substituídos por valas.

Referências Bibliográficas

- BERTRAND, A. R. AND H. KOHNKE. 1957. Subsoil conditions and their effects on oxygen supply and the growth of corn roots. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 21(2):135-140.
- BEERS, W. I. J. van. 1965. Some nomographs for the calculation of drain spacings. Wageningen, The Netherlands, International Institute for Land Reclamation and Improvement. 48 p. (Bulletin 8).
- BEERS, W. F. J. van. 1963. The auger hole method. A field measurement of the hydraulic conductivity of soil below the watertable. Wageningen, The Netherlands, International Institute for Land Reclamation and Improvement. 32 p. (Bulletin 1).
- BIRKLE, D. E., J. LETEY, L. H. STOLZY AND T. E. SZUSZKIEWICZ. 1964. Measurement of oxygen diffusion rates with the platinum microelectrode. II. Factores influencing the measurement. Hilgardia 35(20):555-566.
- BOERSMA L. 1965. Field measurement of hydraulic conductivity below a water table. In: Black C. A., Ed. and others. Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling. Madison, American Society of Agronomy, pp. 222-233.
- BUCKINGHAM, E. 1904. Contributions to our knowledge of the aeration of soils. USDA Bureau of Soils (Bulletin 25).
- CANON, W. A. 1925. Physiological features of root with special reference to the relation of roots to aeration of the soil. Carnegie Institute, Washington. (Publication 368).
- CHRISTIANSEN, J. 1966. Riego y Drenaje. Capitulo IX. Drenaje de tierras irrigadas. pp. 389-500. Instituto Nacional de Tecnologia Agropecuaria, Buenos Aires, Argentina.
- CLINE, R. A. AND A. E. ERICKSON. 1959. The effect of oxygen diffusion rate and applied fertilizer on growth, yield and chemical composition of peas. Soil. Sci. Soc. Amer. Proc. 23(5):333-335.

- CURRIE, J. A. 1960. Gaseous diffusion in porous media: 2. Dry granular materials. *British Journal of Applied Physics* 11:318-324.
- DIELEMAN, P. J. AND N. A. DE RIDDER. 1972. Elementary groundwater hydraulics. pp. 153-99. *In: Drainage Principles and Applications. Publication 6, Vol. I, International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands.*
- DONNAN, W. W, C. B. BRADSHAN and H. BLANEY. 1954. Drainage investigations in Imperial Valley, Calif. 1941-51. TP-120. U. S. Conservation Service.
- DONNAN, W. W. 1957. Field investigations. pp. 446-459. *In: Luthin, J. N. (ed), Drainage of Agriculture Lands. Madison, Wis. American Society of Agronomy (Agronomy Series 7).*
- ERICKSON, A. E. AND D. M. VAN DOREN. 1960. The relation of plant growth and yield to soil oxygen availability. 7th International Congress of Soil Science III: 428-434.
- GARDNER, W. R. 1965. Movement of nitrogen in soil. *In: W. V. Bartholomev and F. E. Clark (ed.), Soil Nitrogen. Agronomy Series 10:550-572.*
- GRABLE, A. R. 1966. Soil aeration and plant growth. *Advances in Agronomy* 18:57-106.
- GRASSI, C. J. 1969. Manual de Drenaje Agrícola. Mérida, Venezuela, Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras. 186 p. (Documento de Enseñanza N° 63).
- GOULART, JAU PAULO. 1971. Irrigação e Drenagem. Pelotas, R.S, Universidade Federal de Pelotas, Escola de Agronomia Eliseu Maciel. 206 p. (Documento de Ensino).
- JOHNSON, H. P., FREVERT, R. K. AND EVANS, D.D. 1952. Simplified procedure for the measurement and computation of soil permeability below the water table. *Agricultural engineering* 33(5):238-286.
- KESSLER, J. 1966. Reconocimiento de las condiciones del agua subterránea. Primer curso nacional de drenaje agrícola. La Molina, Lima-Perú, Universidade Nacional Agraria.

- KRAMER, P. J. 1951. Causes of injury to plants resulting from flooding of the soil. *Plant Physiology* 26:722-736.
- LEMON, E. R. AND A. ERICKSON. 1952. The measurement of oxygen diffusion in the soil with a platinum microelectrode. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 16(2):160-163.
- LETEY, J., O. R. LUNT, L. H. STOLZY AND T. E. SZUSZKIEWICZ. 1961. Plant growth, water use and nutritional response to rhizosphere differentials of oxygen concentration. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 25(3):183-186.
- LETEY, J., L. H. STOLZY, G. B. BLANK AND O. R. LUNT. 1961. Effect of temperature on oxygen diffusion rates and subsequent shoot growth, root growth, and mineral content of two plant species. *Soil Sci.* 92(5):314-321.
- LETEY, J., L. H. STOLZY, N. VALORAS AND T. E. SZUSZKIEWICZ. 1962. Influence of soil oxygen on growth and mineral concentration of barley. *Agronomy Journal* 54(6):538-540.
- LETEY, J. AND L. H. STOLZY. 1964. Measurement of oxygen diffusion rates with the platinum microelectrode. I. Theory and equipment. *Hilgardia* 35(20):545-554.
- LINSLEY, R. K., M. A. KOHLER Y J. L. H. PAULHUS. 1967. *Hidrologia para Ingenieros. México*, McGraw-Hill. 350 p.
- LUTHIN, J. N. 1965. *Drainage Engineering*. John Wiley and Sons, Inc.
- LUTHIN, J. N. 1957. Drainage investigation methods. 5. Measurement of hydraulic conductivity in situ. General description of method and theory. In: Luthin, James N., Ed. *Drainage of agricultural lands*. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, pp. 420-439.
- LUTHIN, J. N. AND KIRKHAM, DON. 1949. A piezometer method for measuring permeability of soil in situ below a water table. *Soil Science* 68:349-358.
- MAASLAND, M. 1956. Measurement of hydraulics conductivity by the auger hole methods in anisotropic soil. *Soil Science* 81(5):379-388.
- PARKER, J. 1950. The effect of flooding on the respiration and survival of some south eastern forest tree species. *Plant Physiology* 24:453-460.

- PENMAN, H. L. 1940. Gas and vapor movement in the soil. I. *Journal Agricultural Sci.* 30:437-462.
- REEVE, R. C. 1957. Measurement of permeability in the laboratory. pp 414-419. In: Luthin, J. N. (ed.), *Drainage of Agricultural Lands*. Madison, Wis., American Society of Agronomy (Agronomy Series 7).
- RICHARDS, L. A., Ed. 1954. Diagnostico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Washington D.C., Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América. pp 119-123. (Manual de Agricultura Nº 60).
- RIJTEMA, P. E. 1965. An analysis of actual evapotranspiration. Wageningen, Netherlands, Institute for Land and Water Management Research. 107 p. (Agricultural Research Report 659).
- SALGADO, S., LUIS. 1971. Dos métodos de terreno para determinar la conductividad hidráulica. Chillán, Chile, Universidad de Concepción, Estación Experimental. 40 p. (Boletín Técnico Nº 3).
- STOLZY, L. H. AND J. LETEY. 1964. Measurement of oxygen diffusion rates with the platinum microelectrode. III. Correlation of plant response to soil oxygen diffusion rates. *Hilgardia* 35(20):567-576.
- TAYLOR, S. A. 1949. Oxygen diffusion in porous media as a measure of soil aeration. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 14:55-61.
- VAN BAVEL, C. H. M. 1952. Gaseous diffusion and porosity in porous media. *Soil Sci.* 73:91-96.
- VAN DIEST, A. 1962. Effect of soil aeration and compaction upon yield, nutrient takeup, and variability in a greenhouse fertility experiment. *Agronomy Journal* 54(6):515-518.
- VAN'T WOUDT, B. D. AND R. M. HAGAN. 1967. Respuesta de los cultivos a niveles esce sivamente elevados de humedad del suelo, pp 571-649. In: J. N. Luthin (ed.), *Drenaje de Tierras Agrícolas*. México, Editorial Limusa Wiely, S. A.

- WESSELING, J. Y. W. R. VAN WIJK. 1967. Condiciones físicas del suelo en relación con la profundidad de los drenes, pp 511-560. In: J. N. Luthin (ed.), Drenaje de Tierras Agrícolas. México, Editorial Limusa Wiley, S.A.
- TALSMA, T. 1963. The control of saline groundwater. Meded. Landbouw Hogeschool, Wageningen. 63(10).1-68.
- WIND, G. P. 1965. A field experiment concerning capillary rise of moisture in a heavy clay soil. Netherland Journal of Agricultural Science 3:60-69.
- WIND, G. P. 1961. Capillary rise and some applications of the theory of moisture movement in unsaturated soils. Wageningen, Netherlands, Institute for Land and Water Management Research. (Technical Bulletin 22).

ANEXO I**Questionarios sobre os capítulos do Manual**

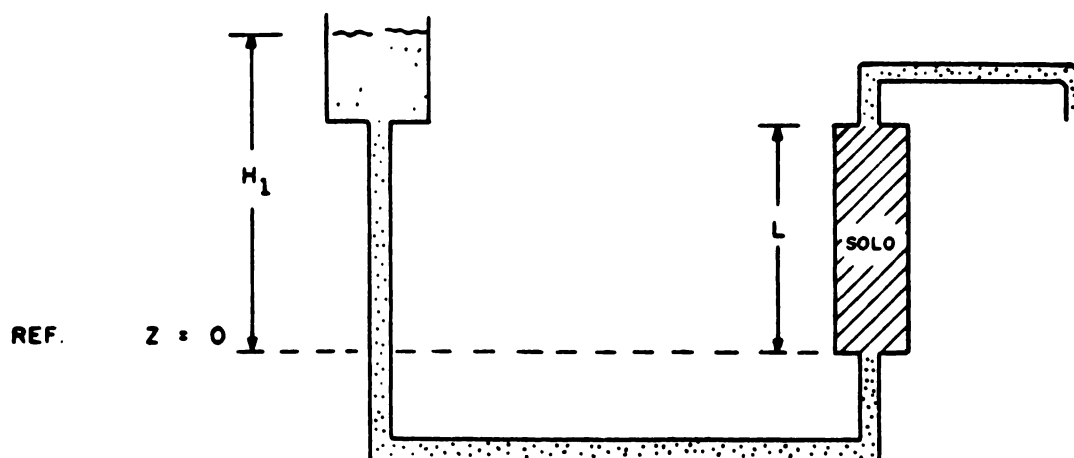
Questionário Nº 1

(Capítulos 1, 2, 3 e 4)

1. Discuta a relação irrigação-drenagem-salinidade para duas situações:
 - a. Regiões áridas e semi-áridas
 - b. Regiões úmidas
2. Quais são os benefícios da introdução de drenagem?
3. Compare a presença de N_2 , O_2 e CO_2 no ar do solo e atmosférico. Quais são as diferenças?
4. Mecanismos de aeração do solo.
5. Discuta o efeito da relação temperatura-oxigênio sobre o crescimento das plantas.
6. Utilidade dos índices de aeração.
7. Respostas fisiológicas das plantas à falta de aeração.
8. Discuta o efeito do excesso de água sobre os rendimentos das culturas.
9. Na Figura 2.6, discuta a situação antes e depois da inflexão da curva. Que conclusões obtêm-se?
10. Que entende por fluxo permanente?
11. Derive a equação para obter a taxa de ascensão capilar no solo.
12. Conclusões das seguintes situações:
 - a. Taxa de ascensão capilar igual a zero
 - b. Taxa de ascensão capilar diferente de zero.
13. Discuta as conclusões obtidas das Figuras 3.1, 3.2, 3.3.
14. Quais são os antecedentes básicos que precisaria conhecer para manejar eficientemente um lençol freático?
15. Aplique o teorema de Bernouilli à condição da água no solo.
16. Defina:
 - a. Carga hidráulica

- b. Carga gravitacional
 - c. Carga de pressão
17. Aplique os conceitos anteriores a um tensiômetro colocado a 50 cm de profundidade e que registra uma sucção de 200 cm de água. Tome como referência a superfície do solo. Comprove seus resultados tomando o extremo inferior do tensiômetro como nível de referência.
 18. Quais são os requisitos necessários para que a água se mova no solo?
 19. Escreva a lei de Darcy. Explique os símbolos e suas dimensões.
 20. Semelhança da lei de Darcy com outras leis. Aplicações.
 21. Como se mede a condutividade hidráulica no laboratório?
 22. Compare o fluxo saturado de uma coluna de solo em posição vertical com o fluxo saturado de uma coluna de solo em posição horizontal. Qual é a diferença?
 23. Defina
 - a. Condutividade hidráulica
 - b. Condutividade capilar
 - c. Fluxo = Vazão. Dê exemplos
 - d. Densidade de fluxo. Dê exemplos
 24. Diferença entre condutividade hidráulica e condutividade capilar.
 25. Qual seria a sequência dos valores de condutividade hidráulica em solo de textura arenosa, argilosa e franca?
 26. Mostre graficamente como se relaciona a condutividade capilar com o conteúdo de umidade do solo.
 27. Mostre graficamente como se relaciona a condutividade capilar com a sucção do solo. Qual é a forma de sua relação empírica?
 28. Para solos com as mesmas texturas que na pergunta 25:
 - a. Qual seria a sequência nos valores (maior a menor) de condutividade capilar quando os solos estão a sucção (tensão) menor a 1 bar
 - b. Sequências nos valores de condutividade capilar (maior a menor) quando os solos estão a sucção maior a 1 bar.
 29. Aplique a lei de Darcy ao caso de movimento de água em solos estratificados.

30. Que entende por transmissibilidade de uma camada de solo. Como se calcula?
31. Em termos de cargas hidráulicas, em que direção se movimenta a água no solo?
32. Do ponto de vista de movimento de água, qual é a diferença entre solos isotrópicos e anisotrópicos?
33. Defina linha de fluxo e equipotencial. Como se relacionam em um solo isotrópico?
34. No gráfico, obtenha o gradiente.



35. Utilizando o esquema e a informação do gráfico Nº 1, determine:
- Densidade de fluxo da água para um solo que tem condutividade hidráulica de 0,05 m/hora.
 - Direção do movimento de água.
36. Fazendo uso da informação do gráfico Nº 2, calcule o tempo necessário para encher o poço.
37. Calcule quanta água se move por dia até um dreno retangular de 90 cm de profundidade e 100 m de comprimento, o qual está localizado a 6 metros ao redor de um reservatório:
A água no reservatório alcança a 2,5 m em comparação ao fundo do dreno.
A condutividade hidráulica do solo é de 1,2 cm/hora.
38. Dois tensiômetros instalados no solo registram as seguintes informações:
Tensiômetro (TA) colocado a 30 cm de profundidade registra sua sucção (SA) de

300 cm de água. Outro tensiômetro (TB) colocado a 15 cm de profundidade registra uma sucção (SB) de 700 cm de água (vide gráfico 3).

Determine:

- a. Carga hidráulica do tensiômetro (TA)
- b. Carga hidráulica do tensiômetro (TB)
- c. Calcule o gradiente entre ambos os tensiômetros
- d. Considerando que o valor da condutividade capilar ao momento das leituras de sucção é 0,05 cm/hr. Qual é a velocidade de fluxo (densidade de fluxo) da água?
- e. Direção em que se move a água.

GRÁFICO 1

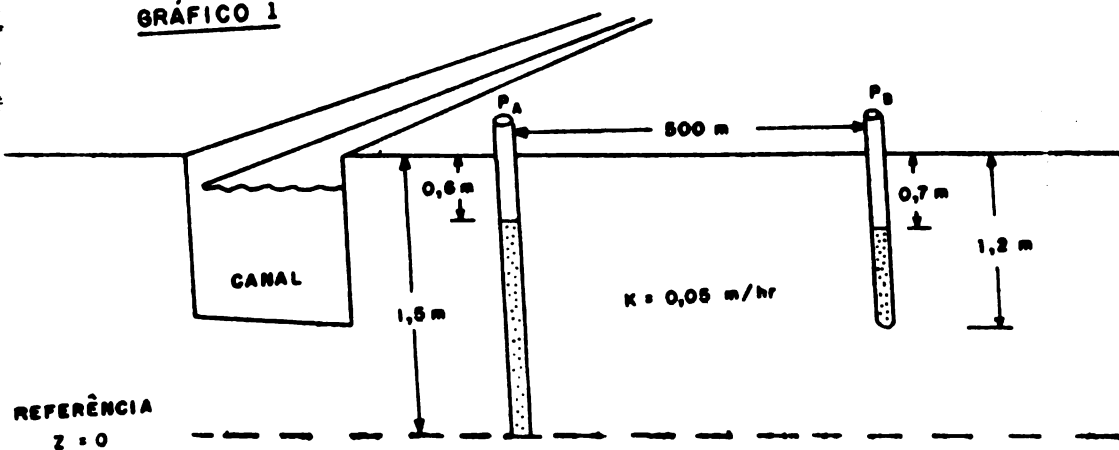


GRÁFICO 2

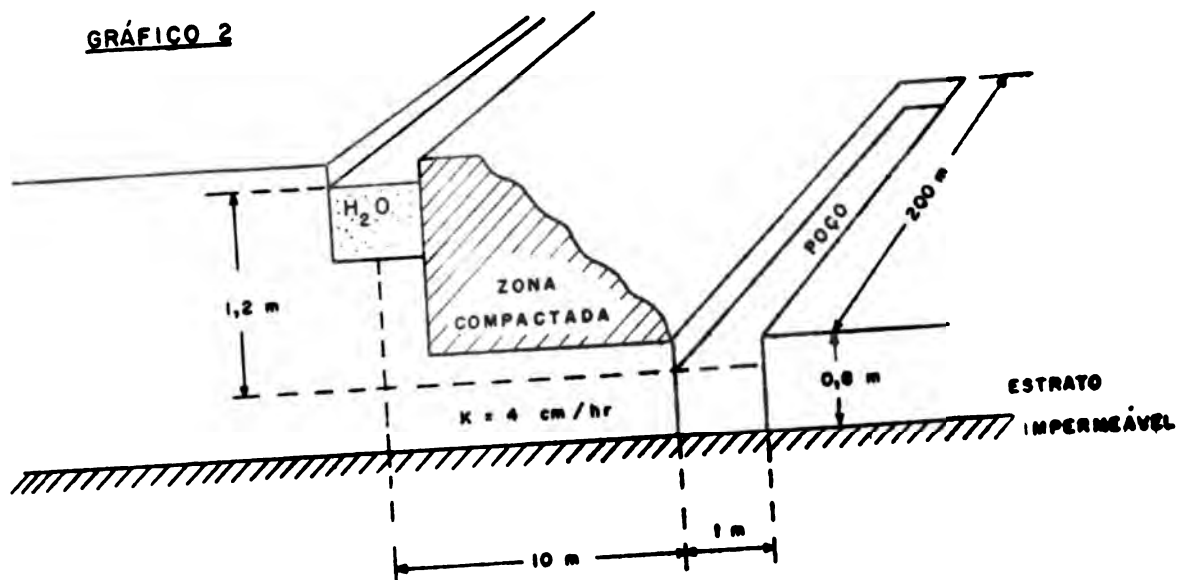
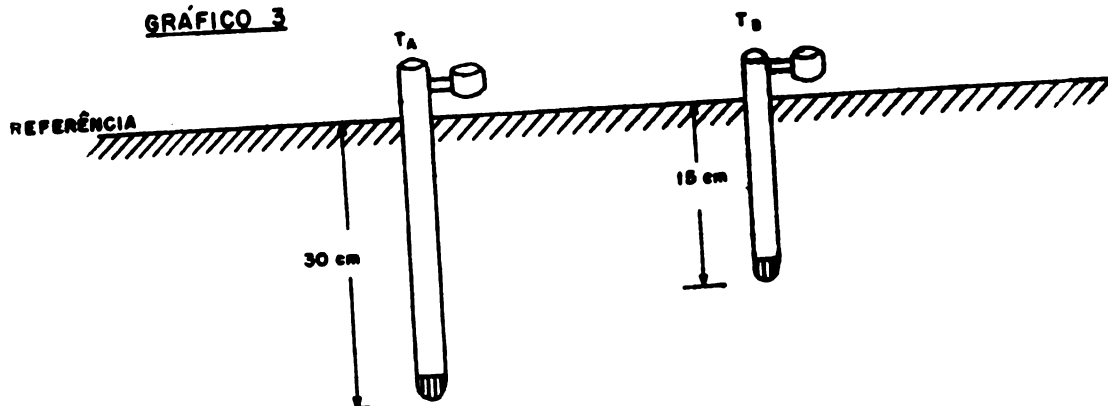


GRÁFICO 3





Questionário Nº 2

(Capítulos 5, 6 e 7)

1. Baseado na Figura 5.1 discuta o ciclo de escoamento.
2. Como se pode calcular a descarga de uma bacia? De que depende?
3. Quais são os fatores que determinam o coeficiente de escoamento?
4. Defina tempo de concentração. Como se calcula?
5. Qual é o componente mais difícil de precisar na fórmula racional? Como se determina?
6. Qual é a diferença entre o método racional e o de McMath para estimar a descarga?
7. Defina coeficiente de drenagem.
8. Que entende por módulo de dimensionamento de drenos?
9. Qual é o roteiro num trabalho para um projeto de drenagem? Etapas e finalidades. Qual é a etapa mais importante?
10. Quais são os estudos básicos importantes numa pesquisa de drenagem?
11. Qual é a escala a utilizar nos mapas a nível de projeto executivo?
12. Do ponto de vista de drenagem, qual é o tipo de mapa de solo que mais interessa?
13. Faça uma lista de materiais que precisaria para instalar um poço de observação. Como efetua o trabalho?
14. Discuta os aspectos de espaçamento, densidade, disposição, leitura e frequência de leituras, dos poços de observação.
15. Que é um piezômetro? Como se instala?
16. Faça uma comparação entre poço de observação e piezômetro.
17. Como pode determinar a condutividade hidráulica em solos estratificados?
18. Em relação ao que representa o valor de condutividade hidráulica determinada mediante piezômetros, discuta as seguintes situações:

- a. Cavidade em que $C \gg R$
 - b. Cavidade em que $R \gg C$
19. Se as dimensões da cavidade ao final do piezômetro são $C = 15 \text{ cm}$ e $R = 3 \text{ cm}$, qual é o valor da Função A?
20. Compare a determinação de condutividade hidráulica mediante o método do trado e o piezômetro. Quais são as vantagens e desvantagens dos métodos?

Questionário Nº 3

(Capítulos 8, 9 e 10)

1. Em que consiste o mapa de isohypsas e que conclusões se podem obter dele?
2. Em que consiste o mapa de isobatas e que conclusões se podem obter dele?
3. Critérios para determinar a "barreira" ou camada impermeável.
4. Utilidade do traçado de perfis freáticos e piezométricos.
5. Tipos de hidrogramas e sua utilidade.
6. Programa de ação baseado no diagnóstico da situação.
7. Qual é a informação básica incluída nas fórmulas de espaçamento de drenos?
8. Quais são as normas de drenagem, e a maneira de formulação? De que dependem?
9. Fórmula de Donnan. Suposições na sua derivação. Informação necessária para sua utilização.
10. Fórmula de Hooghoudt. Expressão e tipos de fluxo. Informação necessária para sua utilização.
11. Que é estrato equivalente? Qual é a razão de sua utilização? Como se calcula (fórmula, tabelas e nomogramas)?
12. Faça o exercício ao pé do Nomograma IX.
13. A equação de Hooghoudt se utiliza quando os drenos estão na cama superior ou na inferior?
14. Utilize o Nomograma XIII para valas e repita o cálculo de página 113.
15. Equação de Ernst. Expressão e tipos de fluxo.
16. Casos especiais da equação de Ernst. Repita exemplos para caso $D > \frac{1}{4} L$ (página 117) e caso $D < \frac{1}{4} L$ (página 119).
17. Qual é a expressão da fórmula de Glover Dumn? Utilidade.
18. Mencione alguns tipos mais comuns de sistemas de drenagem.
19. Que é um dreno interceptor?
20. Como se faz o cálculo para o dimensionamento de valas?

21. Quais são os fatores mais importantes na equação de Manning?
22. Que é o raio hidráulico e perímetro molhado?
23. Faça uso do Nomograma XVI para a equação de Manning. Por exemplo se $n = 0,03$, $R = 0,18$ e $S = 2\%$. Qual é a velocidade?
24. Que relação de talude utilizaria em um solo de textura limosa, arenosa?
25. Diferença entre fluxo constante e fluxo variado.
26. Como calcula o diâmetro e a descarga de tubos subterrâneos?
27. Como calcula o diâmetro de tubos coletores?
28. Discuta: como poderia fazer-se uma avaliação econômica dos benefícios de um projeto de drenagem? como estimaria os benefícios?

ANEXO II

Trabalhos práticos sobre drenagem

TRABALHO PRÁTICO Nº 1. Cálculo da descarga máxima de uma bacia.

Tem-se uma bacia de 320 has em uma região cuja intensidade máxima de chuva é de 40 mm/hora.

Outras informações são as seguintes:

- a. Solo de textura média e declividade de 10-30%
- b. A bacia tem uns 36% de sua área com pastagem e a área restante está coberta com florestas
- c. A trajetória máxima da água na bacia é de 4000 m, e a diferença de nível entre o ponto mais alto e a saída é de 100m.

CALCULAR

1. Tempo de concentração (T_c) do escoamento máximo da bacia.
2. A intensidade máxima de chuva para T_c calculado.
(utilizar gráfico de Hathaway)
3. A descarga máxima que sai da bacia.
4. Seção do dreno coletor na saída da bacia.
(Seção trapezoidal, Talude 1,5:1)

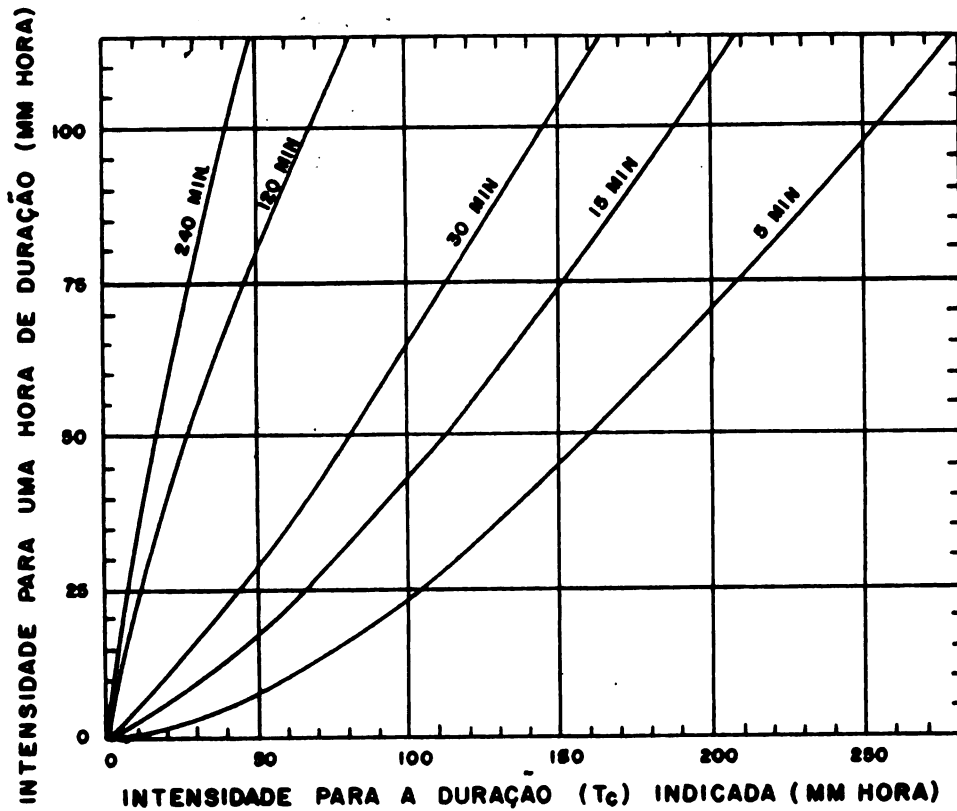


Gráfico 4. Relação entre a intensidade para uma hora de duração e intensidades para outras durações. (Hathaway, G. A. 1945, Design of Drainage facilities. Trans. Am. Soc. Civil Engrs. 110:700).

TRABALHO PRÁTICO Nº 2. Determinação da condutividade hidráulica.

1. Faça um teste de condutividade hidráulica na área indicada no campo, de acordo à metodologia explicada no Manual.

2. Em um teste de condutividade hidráulica pelo método do trado obteve-se a seguinte informação:

a.	<u>t(seg)</u>	<u>Y_t</u>
	0	27.1
	20	26.2
	40	25.2
	60	24.5
	80	23.6
	100	22.8
	120	22.1
	140	21.4

b. Referência sobre o solo (R) = 25 cm

D' = 152 cm s = 90 cm

W' = 60 cm r_{poço} = 5 cm

Calcule a condutividade hidráulica.

3. No problema anterior, determine qual é o erro (%) cometido se:

a. Por equívoco utiliza o Nomograma para r = 4 cm

b. Por equívoco utiliza o Nomograma para S = 0

4. Realizou-se um teste de condutividade hidráulica em um solo de duas camadas mediante a utilização de dois poços.

A profundidade do primeiro poço é de 114 cm e no segundo é de 220 cm.

O lençol freático encontra-se a 30 cm de profundidade, e a profundidade da primeira camada é de 130 cm.

Os dados de recuperação do lençol freático foram os seguintes:

<u>Δt</u> (seg)	<u>Poço 1</u>		<u>Δt</u> (seg)	<u>Poço 2</u>	
	<u>Y₁</u> (cm)	<u>Y₂</u> (cm)		<u>Y₁</u> (cm)	<u>Y₂</u> (cm)
65.6	72	58	30	160	145

TRABALHO PRÁTICO Nº 3. Diagnóstico de um problema de drenagem.

Uma fazenda de aproximadamente 240 ha apresenta problemas de drenagem. Com o fim de obter informação para determinar a magnitude do problema instalaram-se 23 poços de observação, indicados no mapa topográfico.

A informação dos poços de observação para cinco meses inclui-se na Tabela 1.

I. Utilizando estes dados, calcule:

- a. Elevação do lençol freático
- b. Profundidade do lençol freático
- c. Determine o mes de níveis freáticos mais altos na fazenda.

II. Com a informação dada ou calculada, prepare os seguintes mapas:

- a. Curvas de nível da elevação do lençol freático (Isohypsas) com equidistância de 1,50 m
 - Indique direção do fluxo
 - Calcule o gradiente hidráulico na direção do fluxo
- b. Curvas de nível da profundidade do lençol freático (Isobatas ou linhas de isoprofundidade). Trace isobatas de 0,60 m, 1,50 m e 2,40 m
- c. Pinte o mapa anterior da seguinte maneira:
 - Área de 0 - 0,60 m: VERMELHO
 - Área de 0,60 - 1,50 m: VERDE
 - Área de 1,50 - 2,40 m: AMARELO
- d. Desenhe o perfil freático para os poços Nº 3, 8, 13, 18 e 21. (Elevação do lençol freático (cota) na ordenada e distância na abcissa).
- e. Obtenha conclusões da necessidade de drenagem para a fazenda em questão. Qual é o problema e como solucioná-lo?

TABELA 1. Dados de poços de observação

Poço N.º	Elevação Superfície Solo (m)	Elevação Extremo do tubo (m)	MAIO			JUNHO			JULHO			AGOSTO			SETEMBRO		
			A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	28,29	29,04	-	-	-	-	-	-	6,15	-	-	6,48	-	-	6,78	-	-
2	23,46	24,54	1,89	4,23	-	4,23	-	3,39	-	-	3,93	-	-	4,11	-	-	
3	28,11	28,71	5,13	5,34	-	5,34	-	6,33	-	-	6,00	-	-	6,60	-	-	
4	25,20	26,13	5,73	5,76	-	5,76	-	3,81	-	-	4,71	-	-	5,46	-	-	
5	23,04	23,58	4,38	3,84	-	3,84	-	4,02	-	-	4,11	-	-	4,02	-	-	
6	18,81	19,41	4,68	3,60	-	3,60	-	3,90	-	-	3,84	-	-	3,63	-	-	
7	18,60	19,38	5,22	4,41	-	4,41	-	3,63	-	-	3,48	-	-	4,44	-	-	
8	18,39	19,14	2,91	1,92	-	1,92	-	1,62	-	-	1,35	-	-	1,89	-	-	
9	17,52	18,03	2,91	2,31	-	2,31	-	2,01	-	-	1,74	-	-	2,40	-	-	
10	17,28	17,46	4,11	3,75	-	3,75	-	2,91	-	-	2,91	-	-	3,60	-	-	
11	13,95	14,52	4,11	3,63	-	3,63	-	3,51	-	-	3,36	-	-	3,30	-	-	
12	13,80	14,58	2,67	2,31	-	2,31	-	2,04	-	-	1,68	-	-	2,13	-	-	
13	13,17	13,74	2,10	1,83	-	1,83	-	1,71	-	-	1,59	-	-	1,71	-	-	
14	13,26	13,98	3,30	3,15	-	3,15	-	2,55	-	-	2,91	-	-	2,82	-	-	
15	13,23	13,86	4,35	3,87	-	3,87	-	3,42	-	-	3,51	-	-	3,81	-	-	
16	11,34	11,88	4,05	3,57	-	3,57	-	3,90	-	-	3,54	-	-	3,27	-	-	
17	10,68	11,11	3,66	3,36	-	3,36	-	3,21	-	-	3,18	-	-	3,12	-	-	
18	8,94	9,63	4,26	3,87	-	3,87	-	3,72	-	-	3,54	-	-	3,27	-	-	
19	8,73	9,48	4,29	3,99	-	3,99	-	4,29	-	-	4,05	-	-	3,81	-	-	
20	9,90	10,62	6,30	5,88	-	5,88	-	4,80	-	-	4,47	-	-	4,95	-	-	
21	14,70	15,33	2,52	2,55	-	2,55	-	1,86	-	-	0,72	-	-	1,92	-	-	
22	15,75	16,50	2,58	2,43	-	2,43	-	1,44	-	-	1,20	-	-	1,95	-	-	
23	15,15	15,78	2,85	2,97	-	2,97	-	2,37	-	-	2,28	-	-	2,46	-	-	

A: Profundidade do lençol freático desde o extremo do tubo

B: Elevação do lençol freático

C: Profundidade do lençol freático desde o nível do solo

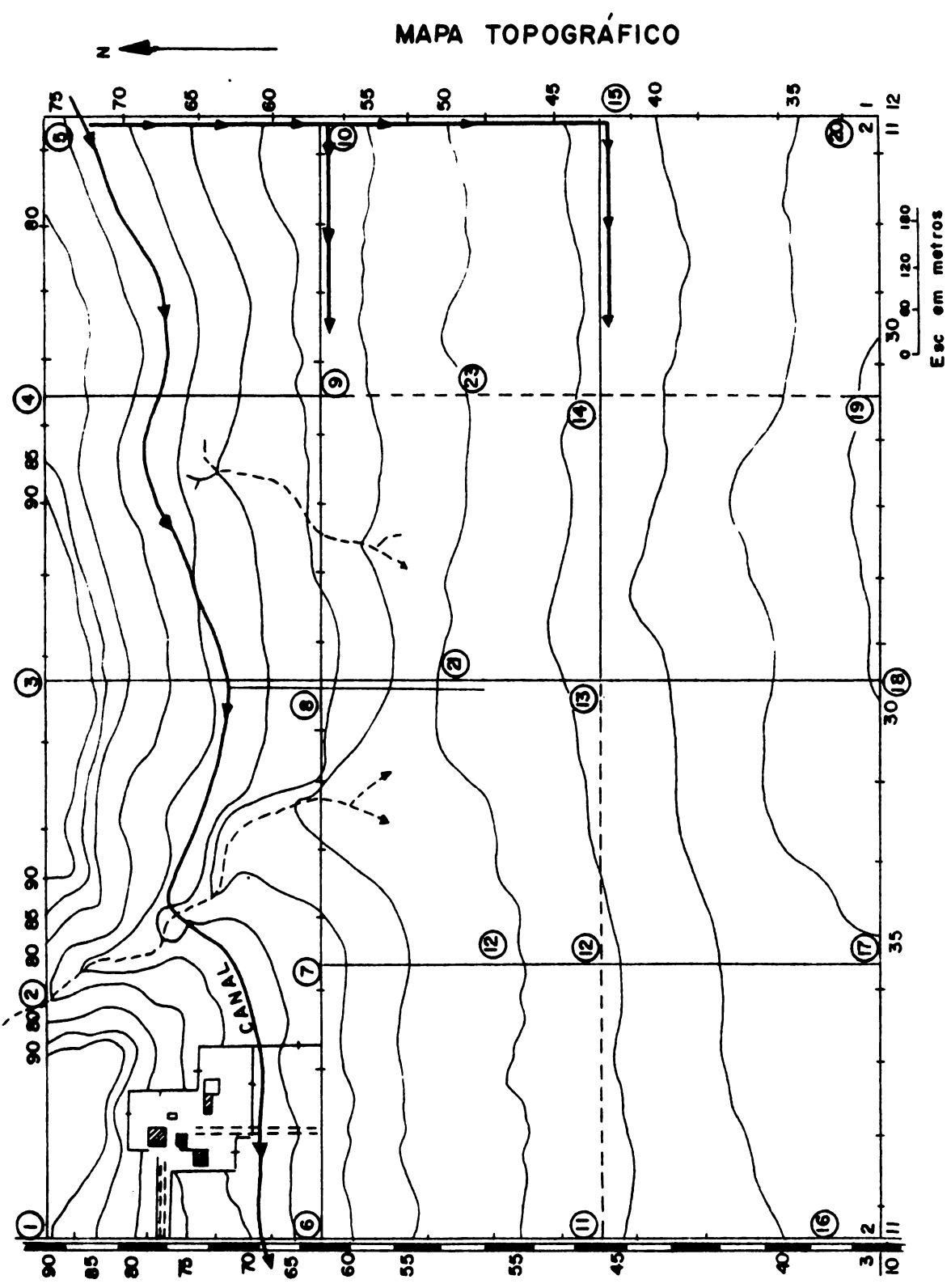


Gráfico 5. Mapa topográfico da fazenda mostrando a localização dos poços de observação.



TRABALHO PRÁTICO Nº 4. Espaçamento de drenos.

Uma área úmida vai ser drenada de tal modo que com uma recarga de 5 mm/dia o lençol freático não se eleve sobre um nível igual a 0,7 m abaixo da superfície. A camada impermeável se encontra a 6,20 m abaixo da superfície. A condutividade hidráulica foi medida e em média tem um valor de 1,2 m/dia.

Para a drenagem do campo podem-se usar valas de 0,5 m de largura no fundo e talude 1:1, ou drenos entubados com tubos de 10 cm de raio externo. O nível da água nos drenos coletores não permitem a instalação de valas a maior profundidade que 1,40 m com um tirante de água de 0,2 m. Quando se trata de drenos entubados considere uma profundidade de 1,20 m.

1. Calcule o espaçamento de:
 - A. Valas com a fórmula de Donnan
 - B. Valas com a fórmula de Hooghoudt
 - C. Drenos entubados com a fórmula de Hooghoudt
2. Explique as diferenças no espaçamento entre 1A, 1B e 1C.
3. Calcule o espaçamento quando $D = \infty$ para drenos entubados usando a fórmula para fluxo radial.
4. Explique a diferença no espaçamento entre 1C e 3.

TRABALHO PRÁTICO Nº 5. Cálculo de espaçamento de drenos.

Uma zona baixa com clima úmido deve ser drenada, de tal maneira que o lençol freático não se eleve mais de 0,5 m por debaixo da superfície do solo com uma recarga prolongada de 7 mm/dia. O nível de água nos drenos coletores limita a profundidade de instalação dos drenos entubados a 1,2 m.

A condutividade hidráulica do solo sobre o nível dos drenos é 0,5 m/dia, e abaixo do nível dos mesmos é 1,2 m/dia.

1. Encontre graficamente o espaçamento entre drenos, considerando que a distância da camada impermeável por debaixo dos drenos pode ter os seguintes valores: ∞ , 10, 5, 3 e 1 m.
 - A. para o caso exposto
 - B. quando $K_1 = 1$ m/dia em vez de 0,5 m/dia
 - C. quando $K_1 = 0,5$ m/dia e $K_2 = 2,4$ m/dia
 - D. quando $K_1 = 10$ m/dia e $K_2 = 2,4$ m/dia
2. Apresente seus resultados em uma tabela e faça uma discussão.
3. Qual é sua conclusão a cerca da importância da determinação da condutividade hidráulica e da profundidade da camada impermeável em pesquisas de drenagem?

TRABALHO PRÁTICO Nº 6. Cálculo de espaçamento de drenos.

Uma zona plana com clima árido é irrigada e se encontra com problemas de drenagem. Dentro da zona há uma área que tem o lençol freático a menor profundidade de 0,5 m. Calculou-se que em estado de equilíbrio entre o lençol freático e a evaporação a ascensão capilar é de 4 mm/dia e por conseguinte existe uma recarga subterrânea de 4 mm/dia.

Destes dados hidrológicos conclue-se que a profundidade do aquífero deve ser muito profundo. A condutividade hidráulica média do solo até os 4 metros foi determinada em 1 m/dia.

Pensa-se instalar um sistema de drenagem com tubos de 10 cm de diâmetro com seixo fino como material filtro protetor. O cultivo que se vai implantar é cana de açúcar, e devido às operações mecanizadas, pensa-se em utilizar coletores entubados.

Considera-se que durante a época vegetativa o lençol freático não deve ter uma profundidade menor de 1,0 m por debaixo do nível do terreno.

Durante a época de madurecimento na qual não se irriga, a profundidade mínima do lençol freático deve ser 1,5 por debaixo do nível do terreno.

Calcule os espaçamentos requeridos, para as duas épocas mencionadas, quando se irriga eficientemente, com perda por percolação de $P = 2$ mm/dia. Qual é o espaçamento crítico? Calcule também os espaçamentos quando se quer reduzir a recarga subterrânea a $S = 2$ mm/dia mediante um melhoramento da eficiência e as práticas de irrigação em toda a zona.

PH-124

Millar, A. A.

AUTHOR

Drenagem de terras

TITLE

agricolas, 1^o principios.

DATE DUE

BORROWER'S NAME

25 SET

Microfilmación

