

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO

INSTITUTO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

DRENAGEM AGRÍCOLA



PROF. JORGE LUIZ PIMENTA MELLO, D.S.

AGOSTO - 2008

Este material se constitui no principal apoio à condução da disciplina **IT 158 – Drenagem**, oferecida aos cursos de Agronomia e Engenharia Agrícola.

ÍNDICE

	Pág.
Capítulo I: Estudos básicos	2
1.1 – Introdução	2
1.2 – Definições	2
1.3 – Objetivos da drenagem agrícola	3
1.4 – Classificação da drenagem agrícola	3
1.5 – Influência da drenagem deficiente nas propriedades físicas dos solos	4
1.6 – Propriedades físicas dos solos afetadas pelo excesso de água	4
1.6.1 – Aeração	4
1.6.2 – Estrutura	5
1.6.3 – Permeabilidade	5
1.6.4 – Textura	5
1.6.5 – Temperatura	5
1.7 – Efeitos da drenagem deficiente no desenvolvimento das culturas	6

1.7.1 – Sustentação	6
1.7.2 – Síntese de hormônios e matéria orgânica	6
1.7.3 – Absorção de água	6
1.7.4 – Absorção de minerais	6
1.8 – Profundidade ótima do lençol freático para cada cultura	7
1.9 – Critérios agronômicos de drenagem	9
1.9.1 – Critério de época de irrigação	9
1.9.2 – Critério de época de chuva	10
1.10 – Práticas agrícolas em solos mal drenados	10
1.11 – Capilaridade	11
1.11.1 – Determinação do valor da capilaridade	13
1.11.2 – Exemplo da determinação de G	14
1.12 - Estudos de permeabilidade dos solos	17
1.12.1 - Método do permeâmetro de carga constante	18
1.12.2 - Método do permeâmetro de carga variável	20
1.12.3 - Método do furo do trado ou do poço (Auger-Hole)	22
1.12.3.1 - Determinação da condutividade hidráulica pelo método do poço, por meio do processo gráfico	25
Capítulo II: Necessidade de lixiviação em solos salinos	31
2.1- O problema de salinidade dos solos	31
2.2- Efeitos da salinidade do solo sobre o rendimento das culturas	32
2.3 - Diretrizes para interpretar a qualidade da água de irrigação	32
2.4 - Práticas culturais para atenuar os problemas de salinidade	33
2.5 – Determinação da lixiviação	33
Capítulo III: Hidrologia subterrânea	37
3.1 - Água freática e lençol freático	37
3.2 - Carga hidrostática	38
3.3 - Estratos e aquíferos	39
3.4 - Escoamento através de estratos saturados	41
3.4.1- Escoamento horizontal através de um estrato: transmissividade	42
3.4.2 - Escoamento horizontal através de vários estratos: condutividade equivalente	43
3.4.3 - Escoamento vertical através de um estrato: resistência hidráulica	45
3.4.4 - Escoamento vertical através de vários estratos: permeabilidade equivalente	46
3.5 – Poços de observação do lençol freático	48
3.6 – Piezômetros	49
3.7 – Hidrógrafas	50
3.8 – Mapas freáticos	51
3.8.1 - Interpretação e aplicações dos mapas freáticos	52
3.8.1.1 - Direção do escoamento freático	52
3.8.1.2 - Gradiente hidráulico	53
3.8.1.3 - Depressões freáticas e zonas altas	53
3.8.1.4 - Influência de rios e correntes superficiais	54
3.8.1.5 - Interpretação dos mapas de variações de nível	54

Capítulo IV: Drenagem subterrânea	55
4.1 – Introdução	55
4.2 – Movimento de água para os drenos	55
4.3 – Espaçamento e profundidade dos drenos	56
4.3.1 – Método direto	57
4.3.2 – Teorias de drenagem – fórmulas empíricas	58
4.3.2.1 – Fórmulas de regime permanente	59
4.3.2.2 – Fórmulas de regime variável	67
4.3.2.3 – Dimensionamento dos drenos	82
Capítulo V: Drenagem superficial	85
5.1 – Introdução	85
5.2 – Controle de inundações de áreas agrícolas	85
5.3 – Vazão a eliminar	86
5.4 – Dimensionamento da seção de desaguamento	87
Capítulo VI: Projeto de um sistema de drenagem	93
Capítulo VII: Sistemas de drenagem	104
7.1 – Classificação dos sistemas	104
7.2 – Esquemas de implantação de uma rede de drenagem	104
7.3 – Materiais utilizados em drenagem subterrânea	108
7.4 – Estudos e informações necessárias à um projeto de drenagem	109

CAPÍTULO I: ESTUDOS BÁSICOS

1.1 – INTRODUÇÃO

Em uma área destinada à exploração agrícola, é necessário que, fundamentalmente, o solo possua um teor de umidade adequado à germinação e desenvolvimento das culturas. Desta forma, é necessário que se estabeleça e se mantenha um ótimo equilíbrio da relação água-oxigênio-sais na zona radicular, visando oferecer condições ideais de sobrevivência para as culturas. Se as chuvas da região não são suficientes, em épocas oportunas, para manter o solo com teores de umidade adequados, a irrigação é a técnica recomendada para suprir essa deficiência. Por outro lado, se o solo se mantiver com teores excessivos de umidade durante longos períodos, a adoção de um sistema de drenagem é a solução para o problema.

Em regiões irrigadas, em que são utilizadas águas com teores de sais, a drenagem é utilizada para controlar a elevação do lençol freático bem como eliminar a água de lixiviação, de modo a evitar a salinização do solo.

Os principais benefícios da drenagem agrícola são: incorporação de novas áreas à produção agrícola, aumento da produtividade agrícola, controle da salinidade do solo, recuperação de solos salinos e ou alcalinos, e saúde pública e animal.

1.2 – DEFINIÇÕES

Drenagem: sob o ponto de vista agrícola, é a remoção do excesso de água e sais do solo a uma razão que permita o crescimento normal das culturas.

Drenagem Adequada: é a drenagem necessária para se manter uma agricultura rentável e permanente na área. Isto não implica numa drenagem completa e perfeita, uma vez que o aspecto econômico tem que ser considerado.

Drenagem Natural: é aquela em que o solo em suas condições naturais tem capacidade para escoar a água que atinge a área, proveniente do escoamento superficial e sub-

superficial de áreas altas, transbordamentos de rios, sub-pressões artesianas, excessos de água de irrigações e infiltrações provenientes de canais, mantendo o solo em condições adequadas de aeração para as culturas ali instaladas. Um diagnóstico bem efetuado, mostrará se o solo apresenta drenagem natural eficiente, ou se há necessidade da realização de drenagem artificial em complemento à drenagem natural do solo.

Drenagem Artificial: é aquela necessária quando a drenagem natural não é suficiente para eliminar os excessos de água. Desta forma, a drenagem artificial visa complementar a diferença entre a drenagem natural e a drenagem necessária ou adequada.

1.3 – OBJETIVOS DA DRENAGEM AGRÍCOLA

Em zonas áridas: tem como principal objetivo a manutenção do equilíbrio salino do solo, por meio da lixiviação do excesso de sais.

Em zonas úmidas: tem como objetivo o controle do nível do lençol freático, por meio da eliminação do excesso de água na superfície e no perfil do solo, visando garantir condições favoráveis de aeração, possibilitando, assim, o desenvolvimento adequado das culturas.

1.4 – CLASSIFICAÇÃO DA DRENAGEM AGRÍCOLA

De maneira geral, a drenagem agrícola é dividida em duas categorias: a drenagem superficial e a drenagem subterrânea ou subdrenagem.

A finalidade da drenagem superficial é a remoção do excesso de água proveniente do escoamento superficial, provocado por chuvas com intensidade superior à taxa de infiltração da água no solo. Já a subdrenagem visa o controle do nível do lençol freático, mantendo-o a uma profundidade adequada ao desenvolvimento das culturas.

1.5 – INFLUÊNCIA DA DRENAGEM DEFICIENTE NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS SOLOS

Sob o ponto de vista agrícola, o solo é o produto da intemperização e fragmentação da crosta terrestre por meio de processos físicos, químicos e biológicos, sendo, portanto, um sistema heterogêneo, trifásico, disperso e poroso.

As proporções das três fases do solo, ou seja, sólida (matriz do solo), líquida (solução do solo) e gasosa (atmosfera do solo), variam continuamente e dependem das variáveis tempo, vegetação e manejo, dentre outras.

As condições ideais de um solo dependem do equilíbrio entre as fases líquida e gasosa. Quando a solução do solo começa a ocupar todo o espaço poroso, temos um problema de drenagem, ocasionando falta de oxigênio para o desenvolvimento das plantas. No caso da fase gasosa começar a ocupar o espaço da solução do solo, temos um problema de déficit hídrico, ocasionando deficiência de água para o desenvolvimento das plantas.

1.6 – PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO AFETADAS PELO EXCESSO DE ÁGUA NO SOLO

1.6.1 – Aeração

Aeração é o processo pelo qual gases consumidos ou produzidos dentro do perfil do solo, são permutados pelos gases da atmosfera externa, sendo assim um processo dinâmico.

A simples ocorrência da fase gasosa no solo não implica necessariamente que este solo tem aeração adequada. A fase gasosa é necessária para existir aeração, mas isoladamente não é suficiente, pois a aeração é dinâmica e, portanto, deve existir troca de gases entre a atmosfera interna e externa do solo. Essa troca de gases se dá por meio de dois mecanismos: **difusão** (movimento dos gases em resposta ao gradiente de pressão parcial ou do gradiente de concentração dos gases) e **fluxo de massa** (movimento dos gases em resposta ao gradiente de pressão total dos gases).

Desta forma, solos com excesso de água, provocam interferência no processo de aeração, fazendo com que esta troca de gases do solo para a atmosfera e vice-versa, seja alterada.

1.6.2 – Estrutura

A drenagem deficiente pode alterar a estrutura do solo devido à compactação ocasionada pelo tráfego de máquinas e animais, redução da quantidade de matéria orgânica devido ao pequeno desenvolvimento do sistema radicular das plantas e salinização do solo.

1.6.3 – Permeabilidade

Em áreas drenadas, a variação da umidade provoca rachaduras no solo, maior profundidade do sistema radicular, como também maior atividade microbiana e, como consequência, maior permeabilidade.

1.6.4 – Textura

Áreas com problema de drenagem, tem maior predominância de silte e argila, em decorrência das deposições nas estações chuvosas.

1.6.5 – Temperatura

Nos solos encharcados, ocorre o aquecimento retardado em função dos seguintes fatores:

- a – o calor específico da água é cinco vezes maior do que a matriz seca do solo. Consequentemente, para uma mesma radiação solar incidente, o solo com água demora mais a aquecer que um solo seco;
- b – a condutividade térmica da água é maior que a do solo seco. Em consequência, o aquecimento superficial durante o dia é rapidamente propagado para as camadas inferiores do solo durante a noite, reduzindo a sua temperatura;
- c – em decorrência da evaporação superficial, em solos úmidos, a água é facilmente desprendida da matriz, necessitando, portanto, de menor aquecimento do solo para a retirada de água.

1.7 – EFEITOS DA DRENAGEM DEFICIENTE NO DESENVOLVIMENTO DAS CULTURAS

1.7.1 – Sustentação

Locais com lençol freático alto, fazem com que as culturas tenham sistema radicular raso, ficando sujeitas a tombamento. Além disto, como a área do solo ocupada pela planta é pequena, ocorre com muita rapidez o déficit hídrico, por ocasião de um veranico, que causa rapidamente um rebaixamento do lençol freático.

1.7.2 – Síntese de hormônios e matéria orgânica

Alguns hormônios de crescimento, são sintetizados pelas células dos tecidos do sistema radicular. Com drenagem deficiente, os hormônios não são produzidos ou são produzidos deficientemente.

1.7.3 – Absorção de água

O excesso de água no solo causa pouco arejamento, reduzindo indiretamente a absorção de água, em virtude da diminuição do tamanho do sistema radicular. Além disto, causa decréscimo da permeabilidade das raízes, reduzindo diretamente a absorção de água. Isto ocorre devido ao aumento da concentração de CO₂ em decorrência da deficiência de O₂, causando um endurecimento das paredes das raízes e diminuindo a permeabilidade.

1.7.4 – Absorção de minerais

Tanto a acumulação de sais no vacúolo das células da raiz quanto o seu transporte para a parte aérea (xilema), consomem energia que é liberada na respiração aeróbica. Portanto, a absorção e o transporte de nutrientes ficam altamente comprometidos quando o arejamento do solo é deficiente. Além disto, a maior concentração de CO₂ reduz a permeabilidade dos tecidos da raiz, reduzindo, conseqüentemente, a absorção de minerais.

1.8 – PROFUNDIDADE ÓTIMA DO LENÇOL FREÁTICO PARA CADA CULTURA

Este parâmetro é de fundamental importância para um projeto de drenagem, uma vez que é em função dele que se determina a profundidade que os drenos deverão ter. Conseqüentemente, o espaçamento e a seção de escoamento dos drenos, também ficam na sua dependência, uma vez que todos estes parâmetros são interdependentes.

A presença do lençol freático próximo à zona radicular das culturas, distingue duas situações:

- a – áreas em que parte das necessidades hídricas das culturas são satisfeitas, mesmo que parcialmente, pela ascensão capilar procedente do lençol freático. Esta situação é comum em países ou regiões úmidas que não tem irrigação. Nestes casos, uma profundidade excessiva do lençol, embora tendo um efeito favorável à aeração do solo, pode provocar escassez de água na zona radicular. Além disto, a água freática deve ser de boa qualidade;
- b – áreas que não utilizam água de ascensão capilar do lençol freático, mesmo existindo uma certa deficiência hídrica, pois a contribuição da água do lençol seria prejudicial, em virtude do acúmulo de sais na zona radicular. Esta situação é comum em regiões de clima árido e semi-árido, onde o lençol freático comumente tem água com elevado teor de sais. Nestes casos, deve-se manter o lençol freático mais profundo através da drenagem para evitar a elevação de sais para a parte superior do solo.

Sob o ponto de vista técnico, a profundidade ótima do lençol freático é aquela que não causa diminuição da produção das culturas. Entretanto, na maioria dos casos, a instalação de uma drenagem que assegure esta profundidade é antieconômica. Desta forma, prefere-se que o rendimento das culturas não alcance o máximo, porém que o sistema seja mais econômico.

Em resumo, a profundidade ótima do lençol freático, é aquela que proporciona a menor relação custo-benefício. Mas, esta conclusão é extremamente relativa, porque, na realidade, não há disponibilidade de dados suficientes que permitam o conhecimento da redução de produtividade das culturas causada pelos diferentes níveis do lençol freático, uma vez que existem vários parâmetros tais como preço de mercado na época de colheita e custo de produção, que são difíceis de serem previstos. Ainda, os custos das obras de drenagem são variáveis de um local para outro, tanto o de aluguel de máquinas e implementos quanto dos materiais utilizados nos drenos. Dificilmente a profundidade tecnicamente ótima coincidirá com a convenientemente econômica. A Tabela 1 apresenta a profundidade do sistema radicular de algumas culturas.

Tabela 1 - Profundidade das raízes para algumas culturas (cm)

Culturas	Zona de ramificação densa	Zona de ramificação moderada	Profundidade Extrema
Trigo	30	30-90	120-150
Centeio	50	50-75	150-225
Aveia	50	50-75	120-150
Cevada	70	70-140	150-180
Milho	70	70-140	150-180
Sorgo	65		
Algodão	70	120	
Girassol	30	30-90	275
Beterraba açucareira	30	30-120	150-180
Cana-de-açúcar	70		
Alfafa	90	90-180	180-275
Trevo	90	120-245	
Cenoura	90	150	
Cebola	60	60-90	90-230
Couve	60	60-90	90-230
Couve-flor	30-50	50-90	90-140
Alface	20-30	30-120	230
Tomate	60	60-90	120
Pimentão	0-45	45-90	120
Vagem	30	30-75	90
Rabanete	15	60	
Espinafre	25	35-60	105
Batata	25-30	30-100	100
Melão	20-30	30-90	90-120
Pêssego	90		
Maçã	100		
Uva	75		

Fonte: PIZARRO, F. Drenaje Agrícola y Recuperación de Suelos Salinos.

1.9 – CRITÉRIOS AGRONÔMICOS DE DRENAGEM

Vimos, anteriormente, que a profundidade ótima do lençol freático é dependente do sistema radicular e das características de cada cultura. Entretanto, na prática, o lençol freático não se mantém estático, uma vez que após uma chuva ou irrigação ele se ascenderá e depois descenderá. Este fato condiciona as necessidades de drenagem das culturas em termos dinâmicos, estabelecendo critérios agronômicos que servirão de base para o dimensionamento de projetos de drenagem. Mais adiante, serão estudadas as aplicações desses critérios no dimensionamento de uma rede de drenagem. No presente tópico, veremos unicamente o que são estes critérios.

Basicamente, existem dois critérios de drenagem: o da época de irrigação e o da época de chuva. Vale ressaltar que os valores a serem sugeridos são, sobretudo, orientativos, movidos pelo fato dos conhecimentos atuais não nos permitirem estabelecer

critérios de drenagem considerados seguros. Esses valores são derivados de observações práticas e são os únicos disponíveis.

1.9.1 – Critério para época de irrigação

Quando ocorre a irrigação, parte da água infiltrada é retida pelo solo, elevando seu teor de umidade, normalmente até alcançar a capacidade de campo. O excesso de água infiltrada, intencional ou inevitável, eleva o lençol freático até a uma altura que, por vezes, é indesejável e problemática. O critério de drenagem para a época de irrigação, estabelece que "**N**" dias após a aplicação de água, o lençol freático deverá rebaixar até uma profundidade "**p**". Os valores de **N** e **p** dependem das culturas e do tipo de solo.

Normalmente se utiliza **N** igual a 3 dias mas, em muitos casos, são mais adequados os valores de **N** igual a 2 ou a 4 dias, sendo o primeiro para culturas mais sensíveis ao excesso de umidade. A Tabela 2 apresenta valores usuais de **p**, na maioria dos casos para **N** igual a 3 dias.

Tabela 2 - Valores de "**p**", para o critério da época de irrigação

Culturas	p (m)
Pastos ⁽¹⁾	
- solos de textura fina	0,70
- solos arenosos	0,50
Hortaliças	0,50 - 0,80
Cultivos extensivos	0,90 - 1,20
Frutíferas	1,50

(1) N = 4 dias

Fonte: PIZARRO, F. Drenaje Agrícola y Recuperacion de Suelos Salinos.

1.9.2 – Critério para época de chuva

Durante a época das chuvas, o lençol freático. está submetido à uma série de oscilações que dependem da ocorrência de precipitações e de suas quantidades. Cada nível freático é alcançado certo número de vezes. Em geral, níveis freáticos mais altos correspondem uma menor frequência, uma vez que fortes precipitações são menos frequentes que as fracas.

O critério de drenagem para época de chuvas se define como sendo: "permite-se que como consequência das chuvas, o lençol freático se eleve até uma profundidade "p" medida desde a superfície do terreno, com uma frequência de "N" vezes por ano." O valor mais comum a ser utilizado é N igual a 5.

Este critério é muito discutível e, sobretudo, muito teórico. A elevação do lençol freático até a profundidade "p", 5 vezes por ano, não quer dizer que haverá perda de colheita cinco vezes por ano. Pode-se afirmar, e a experiência tem mostrado, que a aplicação deste critério conduz a bons resultados práticos. Ele foi elaborado na Holanda mas, estudos efetuados demonstraram que pode ser aplicado no Brasil com boa aproximação, para N igual a 5. Quanto ao valor de p, agrupou-se as distintas culturas em três grupos. A Tabela 3 apresenta estes valores.

Tabela 3 - Valores de "p" para o critério da época das chuvas.

Dias depois da chuva	Profundidade do lençol freático (m)		
	Grupo A	Grupo B	Grupo C
0	0,30	0,50	0,90
1	0,50	0,80	1,10
2	0,70	1,00	1,30
3	0,80	1,10	1,40

Grupo A: pastagem e hortaliças

Grupo B: culturas perenes (extensivas)

Grupo C: frutíferas.

Fonte: PIZARRO, F. Drenaje Agrícola y Recuperacion de Suelos Salinos.

1.10 – PRÁTICAS AGRÍCOLAS EM SOLOS MAL DRENADOS

Objetivamente, a solução ideal para um solo com excesso de água, consiste na instalação de um sistema de drenagem adequado. Em muitos casos, as obras necessárias não podem ser incluídas dentro das práticas culturais, mas às vezes é suficiente uma melhoria da drenagem superficial, que pode ser realizada diretamente pelo agricultor, como é o caso de abertura de pequenos drenos, correção de pequenos pontos de depressão do terreno, etc.

Não sendo possível a execução destes trabalhos, existem práticas culturais que diminuem o efeito prejudicial da drenagem deficiente. São as seguintes:

- a) seleção adequada de culturas;
- b) uso de adubos nitrogenados sob a forma de NH_4^+ , para compensar a menor produção de nitrogênio assimilável procedente da mineralização de matéria orgânica;
- c) se a água do lençol freático, não for salina, estudar a possibilidade de se reduzir a água de irrigação e compensar parte das necessidades hídricas da cultura com água de ascensão capilar;
- d) as práticas culturais não devem ser executadas com uma umidade excessiva do solo, pois o uso de máquinas além de deteriorar a sua estrutura, promove grandes sulcos no terreno que favorecem a retenção de água na superfície; e
- e) utilização da prática da subsolagem, melhorando assim as condições de aeração como também e drenagem.

1.11 – CAPILARIDADE

Em decorrência da evapotranspiração, as camadas superiores do solo perdem umidade, que passa para a atmosfera sob a forma de vapor d'água. Desta maneira, ocorre uma diferença de potencial matricial entre as camadas superiores e inferiores do solo, o que provoca um movimento capilar ascendente de água, que tende a igualar os teores de umidade. Isto não se completa totalmente e, de fato, em um solo submetido a evaporação, o conteúdo de umidade aumenta com a profundidade.

O movimento capilar é devido a ação de forças de adesão, coesão molecular e tensão superficial que atuam no solo. As partículas sólidas do solo, que compõem a sua matriz, atraem as moléculas de água pelo fenômeno da adesão molecular e esta atração é transmitida através da massa de água, mediante a coesão molecular (atração entre moléculas de mesma natureza).

A magnitude desta força de atração, decresce com o aumento da distância entre a molécula de água e a partícula sólida. Sendo assim, a água tende a mover-se das áreas do solo onde as películas líquidas tem maior espessura, até as áreas onde as películas são mais finas, ou seja, de áreas de alto conteúdo de umidade para áreas de menor conteúdo.

A força de gravidade também atua sobre as moléculas de água, mas é muito pequena comparada com as forças de atração sobre moléculas próximas às partículas sólidas. Quando a espessura da película líquida cresce, o efeito relativo da gravidade aumenta, até que se alcança um estado de umidade em que supera as forças de atração molecular.

Devido a capilaridade, a zona do solo situada imediatamente acima do lençol freático, tem um elevado teor de umidade, que decresce a medida que aumenta a distância em relação a ele. Teoricamente, a altura de ascensão capilar é infinita mas, na prática, o fenômeno se interrompe quando a umidade do solo decresce a um certo valor, que se denomina umidade de ruptura de ascensão capilar. Este valor depende de cada tipo de solo. Para os de textura média, é da ordem de 65% do teor de umidade na capacidade de campo.

A distância entre a superfície do lençol freático e o ponto em que ocorre ruptura da ascensão capilar, é chamada distância crítica ou profundidade crítica, que é o termo mais utilizado.

O termo profundidade crítica é geralmente utilizado como sendo a profundidade necessária do lençol freático para que o movimento capilar não afete a superfície do solo ou a zona radicular.

Quando o lençol freático se encontra a uma distância da zona radicular inferior à crítica, ocorre um movimento de água no sentido lençol freático ⇒ zona radicular ⇒ atmosfera. Este movimento não é contínuo e se interrompe devido a uma chuva ou a uma irrigação.

Como na maioria dos casos o lençol freático sempre tem uma certa salinidade, que em muitos casos é bastante elevada, a capilaridade acumula sais nas camadas superiores do solo. Os sais não são eliminados por evapotranspiração e, como consequência, se não ocorrer lixiviação, os horizontes superiores do solo podem salinizar-se. De fato, este é o mecanismo de salinização de grande parte dos solos de clima árido.

1.11.1 – Determinação do valor da capilaridade

Nos estudos de salinização, há necessidade de se realizar um balanço de sais, que se constituem como importante fator de salinização por capilaridade.

A velocidade de ascensão capilar depende de muitos fatores, tais como: tipo de solo, estado de umidade do solo e profundidade freática. Existem várias fórmulas que relacionam estes fatores. Na prática, é mais comum o emprego dos valores da Tabela 4, em virtude da dificuldade de obtenção dos parâmetros necessários nas diferentes equações que estimam a capilaridade.

Os maiores valores são alcançados em solos franco arenosos. Em solos de baixa permeabilidade, a velocidade capilar é menor devida a maior percentagem de poros pequenos (microporos). Em contrapartida, a distância crítica é maior que nos demais solos. Os solos arenosos tem poros mais uniformes, o que faz com que a velocidade capilar diminua rapidamente ao aumentar a profundidade freática.

A Tabela 4 apresenta os dados equivalentes a velocidade capilar máxima, ou seja, a que ocorreria em condições ótimas de umidade, evaporação, etc.

A partir desses dados, é possível estimar a contribuição do lençol freático para a zona radicular, para a superfície do solo ou mesmo para qualquer camada do solo.

Esta contribuição, pode ser estimada para diferentes períodos de tempo, tais como: intervalos entre irrigações, meses, anos, etc. Seu valor é componente do cálculo das necessidades de lixiviação de sais de um solo, como também do balanço de sais.

Tabela 4 - Valores máximos de velocidade capilar (mm dia⁻¹).

Profundidade do lençol freático (cm)	Tipos de solos			
	Argiloso ou franco-argiloso	Franco	Franco arenoso	Arenoso moderado
25	10,0	alta	muito alta	10,0
40	4,0	10,0	muito alta	2,5
50	2,5	3,0	alta	1,0
75	1,0	1,0	alta	0,5
100	0,5	---	10,0	0,2
150	0,2	---	1,0 - 4,0	---
200	---	---	0,5 - 1,0	---

Fonte: PIZARRO, F. Drenaje Agrícola y Recuperacion de Suelos Salinos.

Geralmente, para estes cálculos é tomado o período de 1 ano. Sua estimativa é feita por meio da Equação 1.

$$G = G_1 + G_2 \quad (1)$$

em que

G = contribuição de água do lençol freático [mm tempo^{-1}];

G_1 = contribuição de água do lençol freático durante a temporada com irrigação; e

G_2 = contribuição de água do lençol freático durante a temporada sem irrigação.

1.11.2 – Exemplo da determinação de G

Logo após uma irrigação, o solo tem seu teor de umidade tendendo a capacidade de campo. Devido a evapotranspiração, a umidade decresce e quando é alcançado um determinado valor (umidade crítica ou ponto crítico), novamente é procedida a irrigação. Desta forma, o teor de umidade entre duas irrigações é variável, e como a ascensão capilar depende do teor de umidade do solo, também varia. O exemplo a seguir, apresenta uma estimativa de G .

Dados básicos :

- tipo de solo: franco;
- capacidade de campo: 32 % (em volume);
- ponto de murchamento: 20 % (em volume);
- profundidade efetiva do sistema radicular da cultura: 60 cm;
- prof. média do lençol freático. entre duas irrigações sucessivas: 110 cm;
- critério de suplementação de água ao solo: irrigar-se-á todas as vezes que houver consumo de 1/3 da água disponível do solo;
- período de irrigação: 8 meses.

Resolução

a) estimativa de G_1 :

No momento da irrigação, o teor de umidade do solo será:

$$Ad = 32 - 20 = 12 \%$$

$$1/3 Ad = 1/3 \times 12 = 4\%$$

$$U = 32 - 4 = 28 \%$$

A distância entre a zona radicular e o lençol freático será:

$$d = 110 - 60 = 50 \text{ cm}$$

Quando o solo está na capacidade de campo, a velocidade de ascensão capilar é considerada nula e quando está seco alcança o valor máximo. Este valor é obtido da Tabela 4. De acordo com esta tabela, o valor da ascensão capilar é de 3 mm dia^{-1} , que é a velocidade máxima. Para calcular a velocidade capilar correspondente ao momento da irrigação, é estabelecida a hipótese de que esta velocidade é inversamente proporcional a umidade do solo. Assim sendo, teremos:

$$\text{Velocidade capilar no momento da irrigação} = 3 - 3 \times \left(\frac{28}{32} \right) = 0,38 \text{ mm d}^{-1}$$

É importante observar que entre duas irrigações, a velocidade capilar vai aumentando desde o valor zero até o valor $0,38 \text{ mm dia}^{-1}$, no momento da próxima irrigação. Seu valor médio será:

$$\frac{0,0 + 0,38}{2} = 0,19 \text{ mm dia}^{-1}$$

Como o período de irrigação corresponde à 8 meses, teremos:

$$G_1 = 0,19 \times 240 = 45,6 \text{ mm}$$

b) estimativa de G_2 :

Para a época de chuvas, foi constatado que a profundidade média do lençol freático. era de 135 cm. Logo, a distância entre a zona radicular e o lençol freático será:

$$d = 135 - 60 = 75 \text{ cm}$$

De acordo com Tabela 4, a ascensão capilar é de 1 mm dia^{-1} .

Normalmente, no período sem irrigações, adota-se como velocidade média, $1/3$ da máxima. Assim, teremos:

$$\text{Velocidade média} = 1 \times 1/3 = 1/3 \text{ mm dia}^{-1}$$

Como o número de dias sem irrigação é de 4 meses, o valor de G_2 será:

$$G_2 = 120 \times 1/3 = 40 \text{ mm}$$

Finalmente, o valor de G será:

$$G = G_1 + G_2$$

$$G = 45,6 + 40 = 85,6 \text{ mm}$$

1.12 - ESTUDOS DE PERMEABILIDADE DOS SOLOS

O solo é constituído por uma fase sólida, uma líquida e outra gasosa. A sólida é formada pelos constituintes sólidos do solo e é relativamente estática. As fases líquida e gasosa, são extremamente dinâmicas e inversamente proporcionais, isto é, a medida que aumenta o conteúdo de umidade, diminui o de gases do solo e vice-versa. Os percentuais equivalentes às fases gasosa e líquida, dependem da porosidade total do solo. Desse modo, conhecendo-se a porosidade, é possível se ter uma estimativa das condições de aeração e umidade do solo, por meio da Equação 2.

$$PT = \left(1 - \frac{\delta_{ap}}{\delta_{real}} \right) \times 100 \quad (2)$$

em que

PT = porosidade total do solo [%];

δ_{ap} = massa específica aparente do solo [g cm^{-3}]; e,

δ_{real} = massa específica real do solo [g cm^{-3}].

O espaço ocupado pelo ar (espaço aéreo) é estimado pela Equação 3.

$$EA = PT - \frac{\theta}{100} \quad (3)$$

em que

EA = espaço aéreo [%]; e,

θ = umidade volumétrica do solo [%].

De modo geral, o espaço aéreo adequado para a maioria das culturas situa-se em torno de 10% .

A propriedade física do solo de maior importância em estudos de drenagem é a sua permeabilidade, que é definida como sendo a maior ou menor facilidade com que o solo se deixa atravessar pela água e pelos gases. Quantitativamente, a permeabilidade do solo é determinada sob dois aspectos: em termos de **velocidade de infiltração**, onde se considera a passagem da água da superfície para o seu interior no sentido vertical, em um meio não saturado, que nada mais é que a zona de aeração do solo; e em termos de **condutividade hidráulica**, onde se considera o movimento da água no interior do solo em todos os sentidos e direções, ou seja, no espaço tridimensional, em meio saturado, que é a zona de saturação do solo. Não entraremos em considerações sobre velocidade de infiltração, por se tratar de um assunto pertinente a estudos de permeabilidade para fins de irrigação. Em drenagem, nos interessa o estudo da condutividade hidráulica (k).

A quantificação da condutividade hidráulica pode ser feita por uma série de métodos, tanto de campo como de laboratório. Dentre esses métodos, os principais são os seguintes:

- estimativa pela composição granulométrica do solo;
- estimativa pela distribuição do tamanho de poros do solo;
- utilização de permeâmetro de carga constante;
- utilização de permeâmetro de carga variável;
- método do tubo duplo;
- método do poço ou furo do trado (Auger-Hole);
- método do piezômetro;
- método dos dois poços;
- método dos quatro poços;
- método do poço seco;
- método da descarga de poços profundos; e,
- método dos cilindros infiltrômetros (por meio de dados da velocidade de infiltração básica do solo).

Dos métodos citados, vamos dar destaque a dois de laboratório, permeâmetro de carga constante e carga variável, e um método de campo, o do poço ou furo do trado (Auger-Hole).

1.12.1 - Método do permeâmetro de carga constante

Utilizado para estimativa da condutividade hidráulica em solos com alta permeabilidade (solos arenosos). O esquema do equipamento utilizado é mostrado na Figura 1.

A amostra do solo a ser analisado deve ser, na medida do possível, indeformada, pois estamos extrapolando, à nível de campo, uma determinação executada em laboratório, e quanto mais próximo estivermos da condição real, menores serão as distorções e os resultados terão maior representatividade. A estimativa da condutividade hidráulica é feita por meio da Equação 4.

$$k = \frac{Q \times L}{A \times (L + h)} \quad (4)$$

em que

- k = condutividade hidráulica do solo [m dia^{-1}];
- Q = vazão coletada [$\text{m}^3 \text{ dia}^{-1}$];
- L = altura da amostra de solo no permeâmetro [m];
- h = lâmina de água sobre a amostra (carga hidráulica) [m]; e,
- A = seção transversal do cilindro contendo a amostra [m^2].

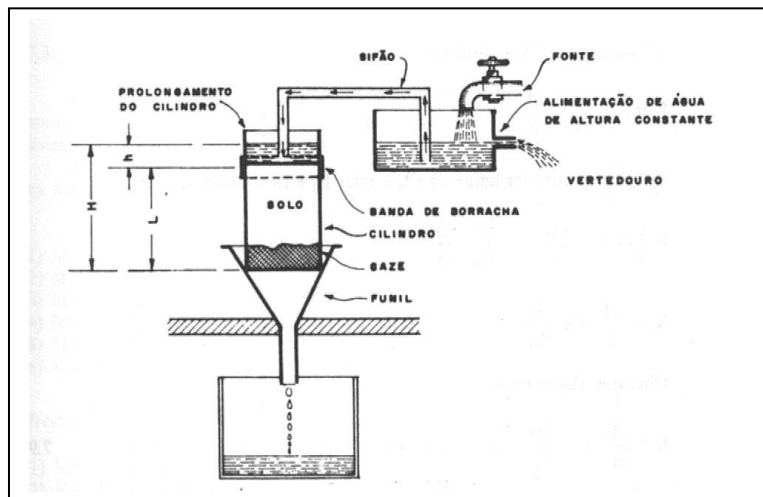


Figura1 - Esquema de um permeâmetro de carga constante.

1.12.2 - Método do permeâmetro de carga variável

Utilizado para estimativa da condutividade hidráulica em solos com baixa permeabilidade (solos argilosos). O esquema do equipamento utilizado é mostrado na Figura 2. De acordo com a figura temos que:

- L = altura da amostra do solo no permeâmetro;
- a = área do tubo de alimentação;
- h_0 = altura inicial da água no tubo;
- h_1 = altura final da água no tubo;
- A = área do permeâmetro contendo a amostra;
- t = tempo de duração de h_0 até h_1 .

Dessa forma, temos que: $V_1 = V_2$

em que

V_1 = volume equivalente ao rebaixamento da água no tubo de alimentação; e,
 V_2 = volume coletado no recipiente.

Podemos expressar os volumes V_1 e V_2 , como sendo:

$$dV_1 = a \times dh$$

$$dV_2 = Q \times dt$$

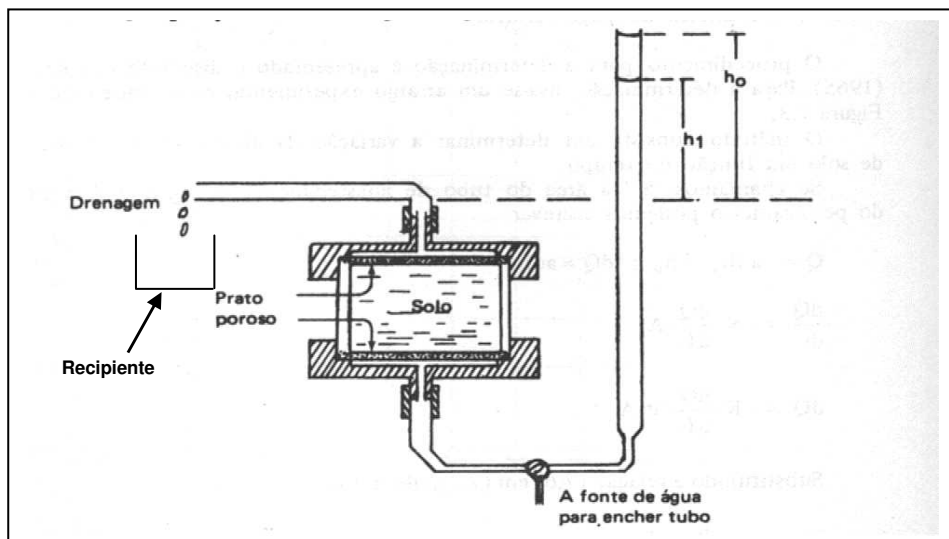


Figura 2 - Esquema de um permeâmetro de carga variável.

Como $V_1 = V_2$, vem que: $Q dt = -a \times dh$

O sinal negativo indica decréscimo de altura com aumento de tempo.

A equação de Darcy, que rege o fluxo de água em um meio saturado, tem a seguinte forma:

$$Q = k \times i \times A$$

em que

- Q = vazão;
- k = condutividade hidráulica;
- i = gradiente hidráulico; e,
- A = área.

O gradiente hidráulico (i), é dado por:

$$i = \frac{\Delta h}{L}$$

Daí resulta que:

$$k \times \frac{\Delta h}{L} \times A \, dt = -a \, dh$$

Integrando, vamos ter:

$$k \times \frac{\Delta h}{L} \times A \int_{t_0}^{t_1} dt = -a \int_{h_0}^{h_1} dh$$

Desenvolvendo a integração e explicitando para k, a condutividade hidráulica (k), será estimada pela Equação 5.

$$k = \frac{L \times a \times \text{LN} \left(\frac{h_0}{h_1} \right)}{A \times t}$$

(5)

1.12.3 - Método do furo do trado ou do poço (Auger-Hole):

Este método é utilizado para a estimativa da condutividade hidráulica no campo, na presença do lençol freático. É adequado para solos homogêneos (não estratificados) e solos altamente estratificados, onde não se tem condições de estimar a condutividade hidráulica em cada camada.

A metodologia para aplicação do método é a seguinte: faz-se um poço no solo com um diâmetro de 8 centímetros, utilizando-se um trado, até que o nível do lençol freático seja ultrapassado como também um pouco além da provável profundidade de instalação dos futuros drenos (Figura 3). Após a abertura do poço, espera-se mais ou menos 24 horas para que haja restabelecimento do nível do lençol freático em seu interior. A profundidade da água no interior do poço, ou seja, do espelho d'água até o fundo, deve ser da ordem de 5 a 10 vezes o seu diâmetro (de 40 a 80 cm).

Por meio de uma bomba manual, começamos a retirar a água do poço até que se verifique um pequeno nível em seu fundo. Após esta operação, começaremos a anotar, a intervalos de tempo constantes (5, 10, 15, 20 seg, etc.), a recuperação do nível do lençol freático, ou seja, registramos a cada intervalo de tempo o quanto o nível se elevará dentro do poço. Os tempos são tomados utilizando-se um cronômetro, e para as alturas, pode-se usar uma régua graduada ou mesmo uma ponta linimétrica.

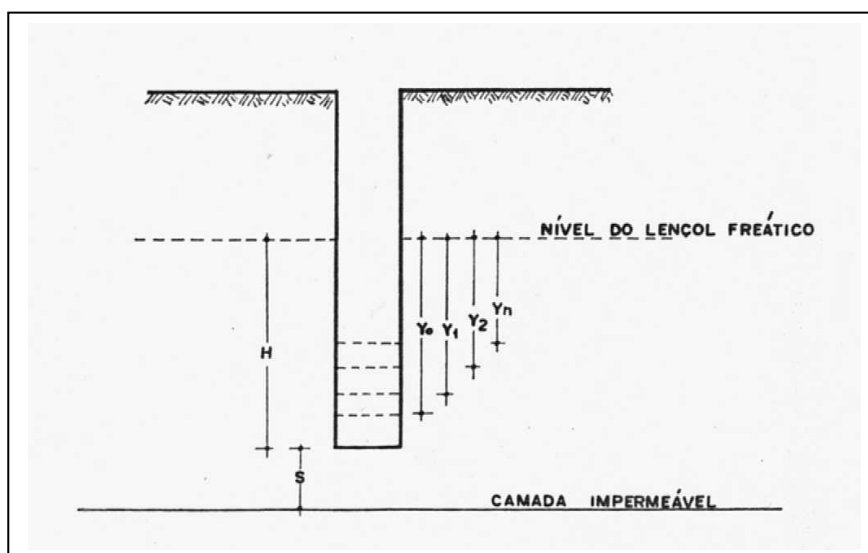


Figura 3 - Esquema de um poço com os respectivos parâmetros para estimativa da condutividade hidráulica.

No ensaio, são medidos vários incrementos de altura (ΔY) para determinados incrementos de tempo (Δt). No princípio, a velocidade de recuperação é grande e, a medida que o nível de água vai aumentando, a velocidade ($\Delta Y/\Delta t$) diminui. No início do ensaio, a relação $\Delta Y/\Delta t$ é aproximadamente linear mas, rapidamente, sua variação torna-se aleatória. O limite de confiabilidade do método corresponde à seguinte relação:

$$Y_n = 3/4 Y_0$$

em que:

Y_n = última leitura referente à distância entre a superfície freática e o nível de água dentro do poço (Figura 3);

Y_0 = primeira leitura efetuada.

Para a estimativa da condutividade hidráulica, foram propostas várias fórmulas empíricas. Vamos destacar a de ERNST, que tem as seguintes formas:

a) Para solo homogêneo e a camada impermeável muito abaixo do fundo do poço ($S > 0,5 H$), utiliza-se a Equação 6.

$$k = \frac{4000}{(H + 20 \times r) \times \left(2 - \frac{Y}{H}\right)} \times \frac{r^2}{Y} \times \frac{\Delta Y}{\Delta t} \quad (6)$$

em que

k = condutividade hidráulica do solo [$m d^{-1}$];

H = distância entre o nível do lençol freático e o fundo do poço [cm];

r = raio do poço [cm];

Y = distância do nível de água no poço ao nível do lençol freático, relativa a cada intervalo de medição [cm];

ΔY = variação do nível da água no poço nos intervalos de tempo (leitura anterior menos leitura atual) [cm]; e,

Δt = intervalo de tempo relativo a cada medição de altura [s].

Para que a equação tenha uma boa aproximação, é necessário que as seguintes condições sejam atendidas:

$$3 < r < 7 \text{ cm}$$

$$20 < H < 200 \text{ cm}$$

$$Y > 0,2 H$$

b) Para solo homogêneo e o fundo do poço apoiado sobre a camada impermeável ($S = 0$), utiliza-se a Equação 7.

$$k = \frac{3600}{(H + 10 \times r) \times \left(2 - \frac{Y}{H}\right)} \times \frac{r^2}{Y} \times \frac{\Delta Y}{\Delta t} \quad (7)$$

c) Para solos heterogêneos com duas camadas

Neste caso, ERNST (1950) propôs a perfuração de dois poços, um situado na primeira camada e o outro até a segunda camada, com o lençol localizado na camada superior (Figura 4).

As condutividades k_1 e k_2 , são estimadas por meio das Equações 8 e 9.

$$k_1 = C_1 \frac{\Delta Y}{\Delta t} \quad (8)$$

$$k_2 = \frac{C_0 \frac{\Delta Y'}{\Delta t'} - k_1}{\frac{C_0}{C_2} - 1} \quad (9)$$

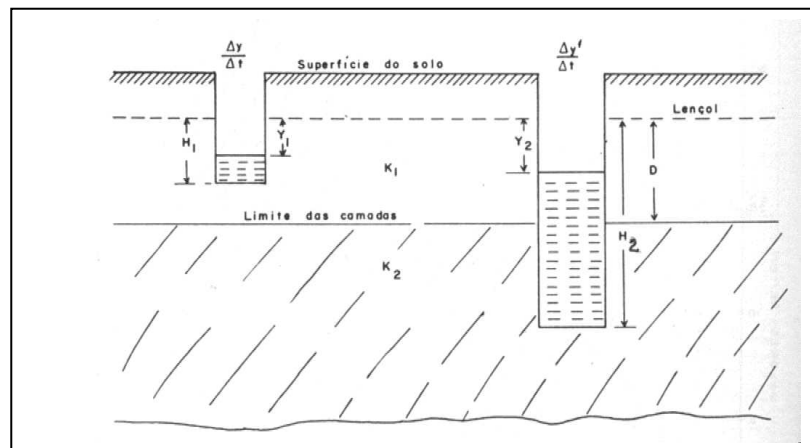


Figura 4 - Esquema para aplicação do método de Ernst para dois poços.

em que

k_1 = condutividade hidráulica da camada superior do solo;

k_2 = condutividade hidráulica da camada inferior do solo;

$\frac{\Delta Y}{\Delta t}$ = velocidade de recuperação no poço superior;

$\frac{\Delta Y'}{\Delta t'}$ = velocidade de recuperação no poço inferior;

C1 e C2 = coeficientes obtidos nos nomogramas 1 ou 2 (Figuras 5 e 6);

C₀ = coeficiente obtido no nomograma 2 em função de D e Y₂.

1.12.3.1 - Estimativa da condutividade hidráulica pelo método do poço, utilizando-se o processo gráfico.

O cálculo é feito utilizando-se os nomogramas 1 ou 2, e o procedimento é o seguinte:

a) de posse dos valores de H (distância entre o nível do lençol freático e o fundo do poço) e de $Y = (Y_0 + Y_n)/2$, determinaremos o valor de C no gráfico;

b) a condutividade hidráulica será estimada pela Equação 10.

$$k = C \frac{\Delta Y}{\Delta t} \quad (10)$$

Exemplo 1:

Com o objetivo de se determinar a condutividade hidráulica de um solo, foi escolhido o método do poço. Para tanto, os seguintes dados foram levantados:

- raio do poço (r) : 4 cm;
- distância do fundo do poço ao lençol freático (H) : 0,50 m;
- primeira leitura efetuada (Y₀) : 0,36 m;
- verificou-se que o fundo do poço não atingiu a camada impermeável.
- valores registrados durante o teste:

t (s)	Leituras (m)	Δt (s)	Y (cm)	ΔY
0	1,060	---	36,0	---
10	1,042	10	34,2	1,8
20	1,028	10	32,8	1,4
30	1,022	10	32,2	0,6
40	1,015	10	31,5	0,7
50	1,005	10	30,5	1,0

60	0,990	10	29,0	1,5
70	0,975	10	27,5	1,5
80	0,961	10	26,1	1,4

O teste será encerrado no tempo de 70 seg, pois foi verificado que:

$$Y_0 = 36 \text{ cm}$$

$$Y_n > 3/4 Y_0$$

$$Y_n > 3/4 \times 36 \quad \Rightarrow \quad Y_n > 27 \text{ cm}$$

De acordo com a tabela vamos verificar que: $Y_n = 27,5 \text{ cm}$.

Estimativa da condutividade hidráulica:

1 - Aplicando a fórmula de ERNST para $S > 0,5 H$, teremos:

$$k = \frac{4000}{(H + 20 \times r) \times \left(2 - \frac{\bar{Y}}{H}\right)} \times \frac{r^2}{\bar{Y}} \times \frac{\sum \Delta Y}{\sum \Delta t}$$

$$\bar{Y} = \frac{Y_0 + Y_n}{2} = \frac{36 + 27,5}{2} = 31,75 \text{ cm}$$

$$k = \frac{4000}{(50 + 20 \times 4) \times \left(2 - \frac{31,75}{50}\right)} \times \frac{4^2}{31,75} \times \frac{8,5}{70}$$

$$k = 1,38 \text{ m d}^{-1}$$

2 - Utilizando o método gráfico:

Para $H = 50 \text{ cm}$, $\bar{Y} = 31,75 \text{ cm}$, o valor de $C = 11,5$.

Aplicando a Equação 10, vamos ter:

$$k = C \frac{\sum \Delta Y}{\sum \Delta t}$$

$$k = 11,5 \times \frac{8,5}{70} = 1,39 \text{ m dia}^{-1}$$

Exemplo 2:

Estimar a condutividade hidráulica pelo método do poço em um solo heterogêneo com duas camadas, sabendo-se que:

Camadas	$\Delta Y/\Delta t$ (cm s ⁻¹)	$\Delta Y'/\Delta t'$ (cm s ⁻¹)	H1 (cm)	H2 (cm)	\bar{Y}_1 (cm)	\bar{Y}_2 (cm)
Superior	0,15		60		35	
Inferior		0,29		150		45

- $S > 0.5 H$

- distância entre o nível do L.F. e o limite das camadas (D) = 80 cm.

- raio dos poços = 4 cm.

a) Estimativa da condutividade hidráulica K1:

Para H1= 60 cm e Y1= 35 cm, o valor de C1 = 9,5

O valor de k1, será:

$$k1 = 9,5 \times 0,15 = 1,43 \text{ m dia}^{-1}$$

b) Estimativa da condutividade hidráulica k2:

Utilizando o nomograma 1 e para H2 = 150 cm e Y2 = 45 cm, o valor de C2 = 3,8.

Utilizando o nomograma 2 e para D = 80 cm e Y2 = 45 cm, o valor de Co = 7,3.

O valor de k2, será:

$$k2 = \frac{7,3 \times 0,29 - 1,43}{\frac{7,3}{3,8} - 1} = 0,75 \text{ m dia}^{-1}$$

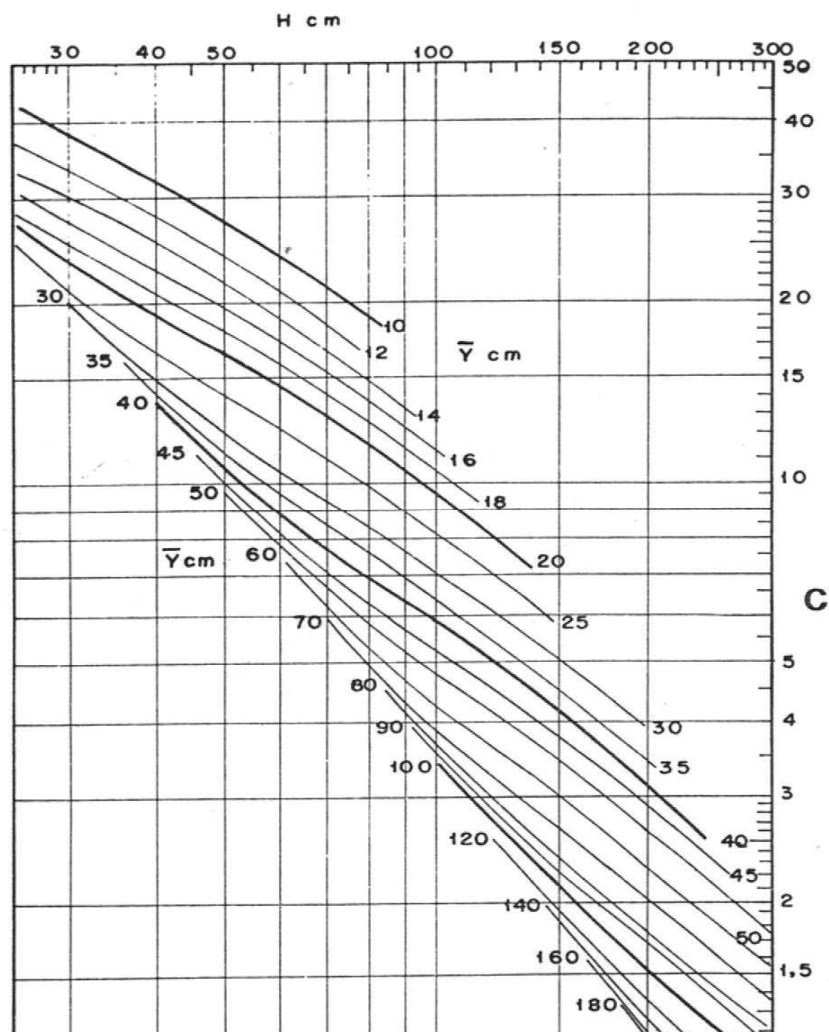


Figura 5 - Nomograma 1.

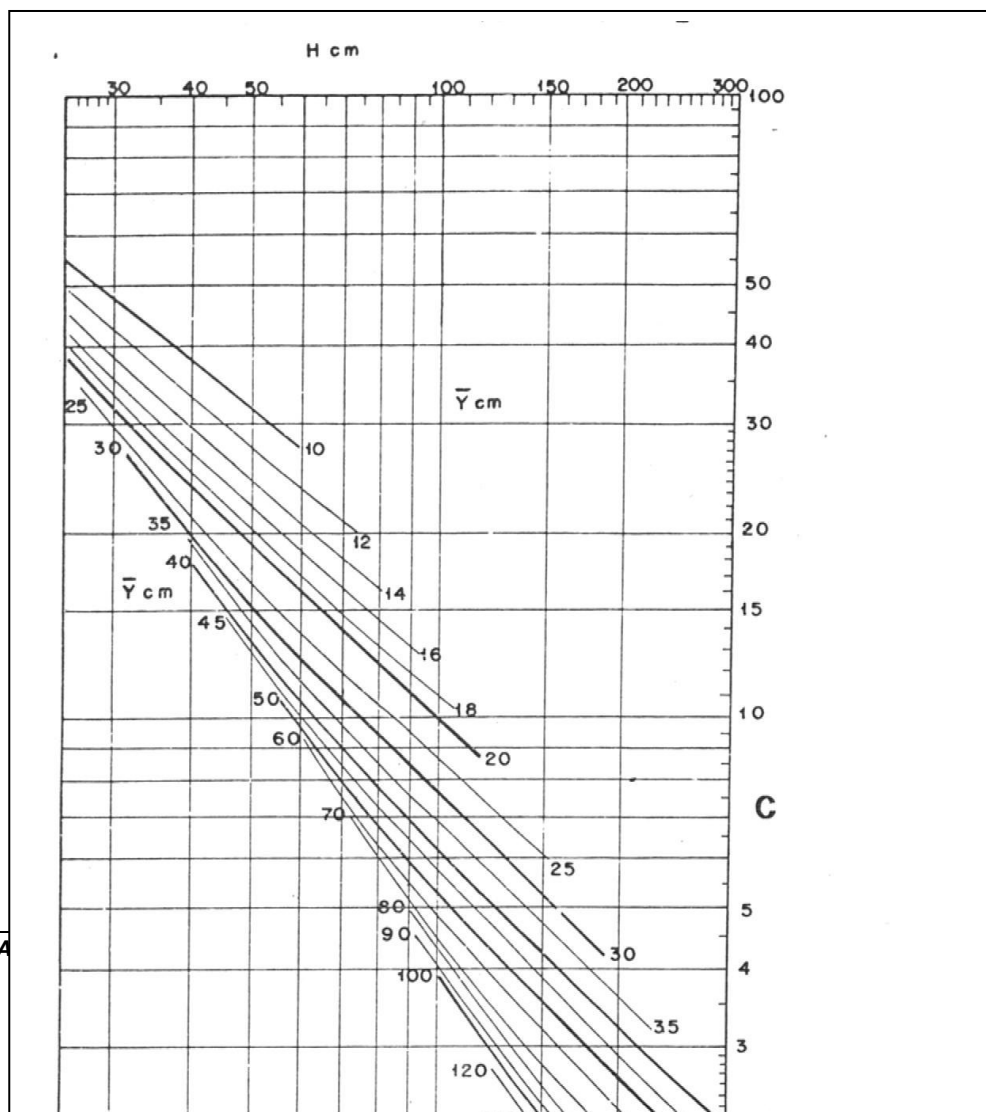


Figura 6 - Nomograma 2.

CAPÍTULO II: NECESSIDADE DE LIXIVIAÇÃO EM SOLOS SALINOS

2.1- O PROBLEMA DA SALINIDADE DOS SOLOS

Normalmente, um problema de salinidade surge quando os sais contidos na água de irrigação se acumulam na região do solo onde se encontra o sistema radicular das culturas e, com isto, seus rendimentos são afetados.

Um outro fator que causa o problema de salinidade é o lençol freático a pouca profundidade, e com sua água salina. O movimento ascendente de água e sais, a partir da superfície freática, penetrando na zona radicular, faz com que os sais fiquem retidos após o processo da evapotranspiração.

Os sais dissolvidos na água de irrigação, vão provocando um aumento da tensão total de retenção da água no solo, reduzindo assim a disponibilidade para as plantas. Para evitar o acúmulo excessivo de sais, estes devem ser eliminados em quantidades aproximadamente iguais aos que existem na água de irrigação, de tal sorte a se proceder um equilíbrio salino. Para isto, deverá ser aplicada uma quantidade adequada de água que permita a infiltração através da profundidade efetiva do sistema radicular. Isto nada mais é que o processo de lixiviação. Esse processo pode ser conduzido em cada irrigação, mas só é necessário quando a concentração de sais no solo implicar em danos à cultura. Em alguns casos, as chuvas, mesmo que concentradas em pequenos períodos do ano, podem cumprir essa função.

A necessidade de lixiviação é definida como sendo a quantidade de água que penetra no solo além da profundidade efetiva do sistema radicular. Esta água de lixiviação deverá então ser eliminada pelo sistema de drenagem.

Se, mediante a lixiviação, se conseguir um equilíbrio salino permanente, a salinidade média do solo na zona radicular estará diretamente relacionada com a qualidade da água de irrigação aplicada, como também da água de lixiviação.

As culturas respondem, em termos de rendimento, à esta salinidade média e, sendo assim, todo aumento de salinidade da água de irrigação, dará como resultado um

aumento de salinidade média do solo. Este aumento pode ter pouca importância prática, a não ser que a concentração cresça a um nível tal que afete significativamente o rendimento das culturas.

2.2- EFEITOS DA SALINIDADE DO SOLO SOBRE O RENDIMENTO DAS CULTURAS

Uma cultura em fase de crescimento tem uma demanda básica de água para o seu máximo rendimento. Esta demanda nada mais é que a evapotranspiração potencial da cultura. Para diferentes cultivos e fases de desenvolvimento, a evapotranspiração está relacionada com as condições climáticas locais, mas pode ser modificada pela salinidade e, conseqüentemente, pela quantidade disponível de água no solo.

A salinidade tem efeito direto sobre a disponibilidade de água no solo para as culturas, que vai diminuindo com o aumento de salinidade. Isto é resultado do efeito osmótico, ou seja, o potencial total de água no solo é aumentado devido o aumento da pressão osmótica.

Pode-se afirmar com isso que, se dois solos idênticos possuírem o mesmo teor de umidade, mas um está livre de sais e o outro é salino, a cultura será capaz de extrair e utilizar mais água do solo que não contém sais, que do solo salino. Conclui-se assim, que a planta terá que dispor de mais energia para absorver água de uma solução salina, em comparação com uma solução isenta de sais, ou seja, para extrair água de uma solução salina, não só terá que vencer o potencial de água do solo em condições normais, mas também o potencial osmótico devido aos sais.

2.3 - DIRETRIZES PARA INTERPRETAR A QUALIDADE DA ÁGUA DE IRRIGAÇÃO

A tabela 5 apresenta os problemas que podem ser acarretados a um solo com o uso de água de má qualidade. A relação de adsorção de sódio (RAS), que expressa o perigo de sódio que pode ter certa água utilizada em irrigação, é expressa pela Equação 11.

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}}} \quad (11)$$

em que

RAS = relação de adsorção de sódio, adimensional;

- Na⁺ = concentração de sódio [meq L⁻¹];
 Ca⁺⁺ = concentração de cálcio [meq L⁻¹]; e,
 Mg⁺⁺ = concentração de magnésio [meq L⁻¹].

2.4 - PRÁTICAS CULTURAIS PARA ATENUAR OS PROBLEMAS DE SALINIDADE

O objetivo principal ao se eleger uma prática de cultivo para resolver um problema de salinidade, é melhorar a disponibilidade de água para as culturas. O usuário de água poderá adotar procedimentos de tal sorte a reduzir os problemas de salinidade que poderão surgir, caso a água de irrigação possua condutividade elétrica acima de 0,7 mmhos cm⁻¹, conforme apresentado nas diretrizes. Os procedimentos mais comuns são:

- irrigar com mais freqüência;
- cultivar plantas tolerantes à salinidade;
- utilizar método de irrigação que melhor controle a salinidade;
- implantar um sistema de drenagem artificial;
- nivelar o terreno para que a aplicação de água seja a mais uniforme possível;
- modificar o perfil do solo, mediante subsolagens, para melhorar a infiltração de água; e,
- utilizar água adicional para satisfazer as necessidades de lixiviação dos sais.

2.5 – DETERMINAÇÃO DA LIXIVIAÇÃO

Com relação ao último procedimento das práticas culturais para atenuar os problemas de salinidade, normalmente, na irrigação por superfície, no qual se emprega grandes quantidades de água e, face a baixa eficiência desse método de irrigação, quase sempre é desnecessária a aplicação de quantidade adicional de água para satisfazer as necessidades de lixiviação de sais, devido as perdas de água por percolação, inerentes à estes sistemas. Mesmo assim, as necessidades de lixiviação de sais devem ser calculadas. Inicialmente, calcula-se o fator de lixiviação, de acordo com a Equação 12.

$$FL = \frac{CEA_i}{5 CEE_s - CEA_i} \quad (12)$$

Tabela 5 – Diretrizes para interpretar a qualidade da água para irrigação

Tipo de problema	Guia para qualidade da água			
	Unidade	Não há problema	Problema crescente	Problema grave
Salinidade (afeta as disponibilidades de água às plantas) - Condutividade elétrica da água (CE)	dS m ⁻¹	< 0,7	0,7 – 3,0	> 3,0
Permeabilidade (afeta a taxa de infiltração da água no solo) - Condutividade elétrica da água (CE) - RAS • Montmorilonita • Ilita • Caulinita	dS m ⁻¹	> 0,5	0,5 – 0,2	< 0,2
	-----	< 6,0	6,0 – 9,0	> 9,0
	-----	< 8,0	8,0 – 16,0	> 16,0
	-----	< 16,0	16,0 – 24,0	> 24,0
Toxicidade iônica específica (afeta as culturas sensíveis) - Sódio (Na) • Irrigação superficial • Irrigação por aspersão - Cloretos (Cl) • Irrigação superficial • Irrigação por aspersão - Boro (B)	RAS	< 3,0	3,0 – 9,0	> 9,0
	meq L ⁻¹	< 3,0	> 3,0	-----
	meq L ⁻¹	< 4,0	4,0 – 10,0	> 10,0
	meq L ⁻¹	< 3,0	> 3,0	-----
	mg L ⁻¹	< 0,7	0,7 – 3,0	> 3,0
	mg L ⁻¹	< 5,0	5,0 – 30,0	> 30,0
Efeitos diversos (afeta as culturas suscetíveis) - Nitrogênio (NO ₃ - N ou NH ₄ - N) [*] - Bicarbonato (CO ₃ H) com aspersores • Irrigação aspersão - pH	meq L ⁻¹	< 1,5	1,5 – 8,5	> 8,5
	-----	-----	6,5 – 8,4	

Fonte: Ayers, R. S., Westcot, D. W. Calidad del agua para la agricultura. Estudio FAO: Riego y Drenaje n° 29.

(*)NO₃ - N: nitrogênio na forma de NO₃ e NH₄ - N: nitrogênio na forma de NH₄.

Conversões: mg L⁻¹ ≅ ppm; mmhos cm⁻¹ ≅ 640 mg L⁻¹; meq L⁻¹ = 10 mmhos cm⁻¹.

Atualmente, a unidade padronizada pelo sistema internacional para expressar a condutividade elétrica da água é o dS m⁻¹ (deciSiemens por metro); 1 dS m⁻¹ = 1 mmhos cm⁻¹.

em que

FL = fator de lixiviação, adimensional;

CEA_i = condutividade elétrica da água de irrigação, obtida a partir da análise de água [mmhos cm⁻¹];

CEE_s = condutividade elétrica do extrato de saturação do solo, obtida a partir da Tabela 6, em função do grau de diminuição do rendimento igual a 10%, [mmhos cm⁻¹].

Se o sistema de irrigação adotado for por aspersão ou localizado, o fator de lixiviação deverá ser calculado por meio da Equação 13.

$$FL = \frac{CEA_i}{5 \text{ CEE}_s \text{ máximo}} \quad (13)$$

Conhecido o fator de lixiviação e a irrigação real necessária, a necessidade de água de lixiviação será determinada tomando por base a Equação 14.

$$IRN_L = \frac{IRN}{1-FL} \quad (14)$$

em que

IRN_L = necessidade de água de lixiviação [mm];

IRN = irrigação real necessária [mm].

Exemplo

Uma cultura de milho será cultivada em uma região onde as necessidades hídricas foram estimadas em 4,5 mm dia⁻¹, com um turno de rega de 6 dias. A irrigação real necessária foi estimada em 27 mm. A condutividade elétrica da água de irrigação a ser usada, foi medida e o valor encontrado foi de 1,7 mmhos cm⁻¹ a 25^o C. Nessas condições, qual deverá ser a quantidade de água a aplicar, sabendo-se que o sistema de irrigação será por superfície ?

Tabela 6 – Tolerância à salinidade de algumas culturas, com referência à condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (mmhos cm⁻¹)

Cultura	Diminuição de rendimento (%)				
	0	10	25	50	Máximo
Abacate	1,3	1,8	2,5	3,7	6,0
Algodão	7,7	9,6	13,0	17,0	27,0
Arroz	3,3	3,8	5,1	7,2	11,5
Batata	1,7	2,5	3,8	5,9	10,0
Cebola	1,2	1,8	2,8	4,3	7,5
Cevada	8,0	10,0	13,0	18,0	28,0
Feijão	1,0	1,5	2,3	3,6	6,5
Laranja	1,7	2,3	3,2	4,8	8,0
Limão	1,7	2,3	3,3	4,8	8,0
Melão	2,2	3,6	5,7	9,1	16,0
Milho	1,7	2,5	3,8	5,9	10,0
Pepino	2,5	3,3	4,4	6,3	10,0
Soja	5,0	5,5	6,2	7,5	10,0
Sorgo	4,0	5,1	7,2	11,0	18,0
Trigo	6,0	7,4	9,5	13,0	20,0
Tomate	2,5	3,5	5,0	7,6	12,5

a) Determinação do fator de lixiviação

$$FL = \frac{CEA_i}{5 CEE_s - CEA_i}$$

Da tabela 6 e para uma diminuição de rendimento de 10%, o valor da CEE_s para o milho é de 2,5 mmhos cm⁻¹. Assim, o FL será:

$$FL = \frac{1,7}{5 \times 2,5 - 1,7} = 0,157$$

b) Determinação da quantidade de água de lixiviação

$$IRN_L = \frac{IRN}{1 - FL} = \frac{27}{1 - 0,157} = 32 \text{ mm}$$

CAPÍTULO III: HIDROLOGIA SUBTERRÂNEA

3.1 - ÁGUA FREÁTICA E LENÇOL FREÁTICO

Do total de água precipitada sobre o terreno, chuva ou irrigação, uma parte se infiltra. Se o solo contém baixo teor de umidade, a água infiltrada é retida por uma certa camada de solo, não permitindo a redistribuição da água a uma maior profundidade, até que a camada superior atinja a capacidade de campo. A partir disso, alguns fenômenos de efeitos opostos começam a acontecer: por um lado, a transpiração e a evaporação diminuem a umidade do solo; por outro, a ocorrência de nova chuva ou irrigação, aumentam. Se a lâmina precipitada superar àquela evapotranspirada, a água em excesso se redistribui (movimenta) a uma profundidade cada vez maior, deixando todo o perfil do solo com um teor de umidade teoricamente na capacidade de campo.

Desta maneira, a lâmina percolada pode alcançar um estrato impermeável, ou pouco permeável, cuja velocidade da água seja inferior àquela das camadas superiores. Nestas condições, o solo situado acima do estrato impermeável atinge a capacidade de campo e se satura com as novas precipitações. Se continuar havendo entrada de água no solo, a zona saturada se elevará, podendo chegar próxima à superfície do solo.

No perfil do solo, pode-se distinguir três estratos, conforme Figura 7.

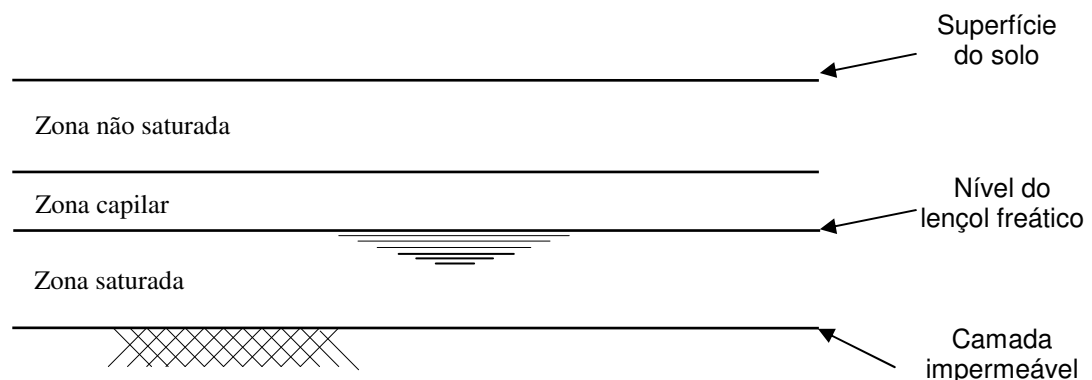


Figura 7 – Representação da distribuição de água no solo.

É a mais profunda, em que todos os poros do solo estão ocupados com água. Parte da água está retida junto às partículas do solo, cujo volume é igual à microporosidade. Para o resto da água, cujo volume é igual à macroporosidade, a gravidade é a força dominante, de forma que, se existir uma saída (drenos ou bombeamento), essa água pode ser extraída. A água presente na zona saturada é chamada de água freática e o seu limite superior é denominado de lençol freático.

b) Zona capilar

É a faixa de solo situada imediatamente acima do lençol freático. Pelo efeito da capilaridade, a água freática da zona saturada se eleva acima do lençol. Nesta faixa de solo, o conteúdo de umidade diminui à medida que se distancia do lençol, até alcançar uma distância crítica. Nesta faixa, a água é chamada de capilar.

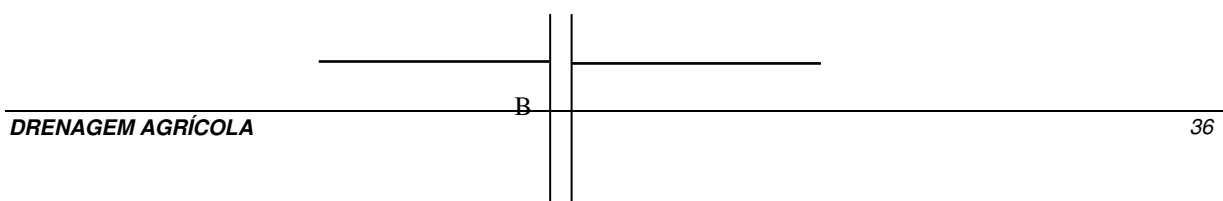
c) Zona não saturada

Se estende do limite superior da zona capilar até a superfície do solo. Pode ter uma espessura de alguns metros ou de poucos centímetros, podendo, em alguns casos, nem existir (terrenos pantanosos). O conteúdo de umidade é muito variável. Em períodos secos, pode chegar até abaixo do PM e, após o período de chuvas, pode atingir temporariamente a saturação. Do ponto de vista agrônômico, essa faixa é a mais importante, pois é nela que se desenvolve o sistema radicular das plantas. A água contida nesta faixa é denominada água do solo, e é retida pelo solo contra a força da gravidade.

3.2 - CARGA HIDROSTÁTICA

A carga hidrostática da água freática em um ponto A (Figura 8) é a altura que o nível da água alcançaria em relação a um nível de referência, se se instalasse no terreno um tubo com a extremidade inferior perfurada e coincidindo com o ponto A.

Um tubo desta forma é denominado piezômetro e a carga hidrostática recebe a denominação de altura piezométrica. A carga hidrostática é a soma de h' , altura de água no tubo, e z , altura correspondente do ponto A até o nível de referência.



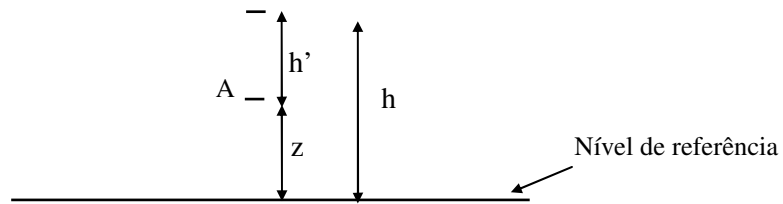


Figura 8 – Representação da carga hidrostática.

O termo h' representa a pressão de água sobre o ponto A, e pode ser expresso em termos de coluna de água, conforme Equação 15.

$$h' = \frac{p}{\rho g} \quad (15)$$

em que

p = pressão de água em A;

ρ = densidade da água; e,

g = aceleração local da gravidade.

O valor da carga hidrostática pode ser determinado pela Equação 16.

$$h = h' + z = \frac{p}{\rho g} + z \quad (16)$$

Na Figura 8, o nível representado por B se denomina superfície piezométrica e, como veremos a seguir, nem sempre coincide com o nível freático.

3.3 - ESTRATOS E AQÜÍFEROS

Do ponto de vista da hidrologia subterrânea, os estratos do solo podem ser classificados como: permeável, semi-permeável e impermeável.

Permeável

Um estrato é considerado permeável quando suas propriedades de transmissão de água são favoráveis em comparação ao estrato situado acima ou abaixo dele. A resistência ao movimento vertical é desprezível e se considera apenas a resistência ao movimento horizontal.

Semi-permeável

Neste caso, as propriedades de transmissão de água são pouco favoráveis. O fluxo horizontal nestes estratos é desprezível, mas não o vertical, já que em geral, devido à sua pequena espessura, a resistência vertical é pequena.

Impermeável

Um estrato é considerado como impermeável quando é praticamente desprezível o movimento de água através dele, tanto no sentido vertical como no horizontal. Para efeitos práticos, se considera impermeável um estrato quando sua permeabilidade é menor que 10 % da permeabilidade dos estratos vizinhos.

Os distintos estratos que contém água se combinam constituindo sistemas aquíferos, os quais podem ser classificados como: não confinados, confinados e semi-confinados.

Não confinados

Consiste na parte saturada de um estrato permeável, abaixo do qual há um estrato impermeável que constitui o limite inferior deste aquífero. O seu limite superior é o nível do lençol freático, que neste caso, coincide com a superfície piezométrica.

Confinados

Consiste de um estrato permeável totalmente saturado de água e compreendido entre dois estratos impermeáveis. Neste caso, o lençol freático e o limite superior da zona saturada coincide com a separação do estrato permeável e o estrato impermeável superior. De outro modo, a superfície piezométrica normalmente está mais alta, de maneira que, se um poço for aberto e penetrar no estrato permeável, a água se eleva acima da separação dos estratos superiores.

Semi-confinado

Consiste em um estrato permeável completamente saturado de água e coberto por um estrato semipermeável. Da mesma forma que no aquífero confinado, a superfície freática se encontra acima do nível de separação dos estratos superiores. Pelo fato do estrato semipermeável permitir um certo movimento vertical, a água freática ascende por este estrato, mas sem alcançar o nível piezométrico, porque a resistência a esse movimento proporciona perdas de carga. Neste caso a superfície piezométrica e o nível freático não coincidem.

A Figura 9 apresenta uma ilustração sobre os três diferentes tipos de aquíferos.

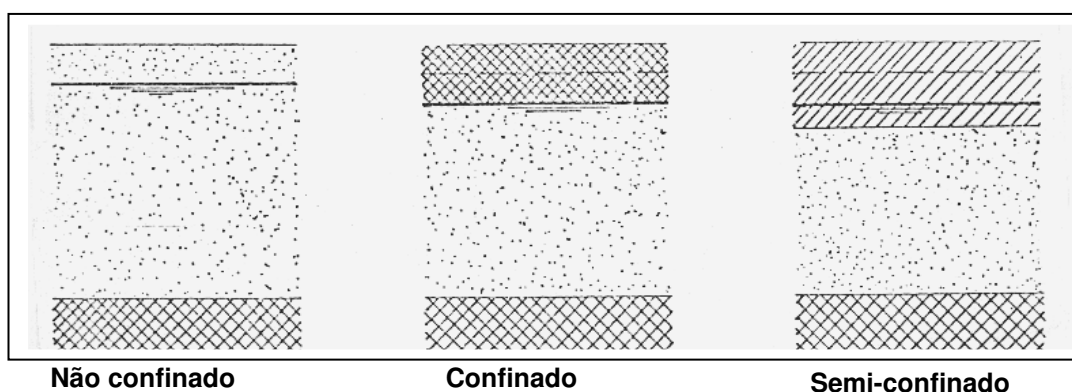


Figura 9 – Esquema ilustrativo dos tipos de aquíferos.

3.4 - ESCOAMENTO ATRAVÉS DE ESTRATOS SATURADOS

No estudo do movimento da água no solo temos que distinguir dois casos: meio saturado e não saturado. O primeiro caso é de maior importância para a drenagem, que objetiva eliminar o excesso de água que satura o solo. O segundo caso, compreende a infiltração da água no solo e outros fenômenos, como o movimento do vapor d'água, absorção de água pelas plantas e outros, que apesar de ser de grande interesse, tem menos importância para a engenharia de drenagem. Por isso, estudaremos o fluxo através de estratos saturados.

3.4.1- escoamento horizontal através de um estrato: transmissividade

A Figura 10 representa um estrato permeável confinado entre dois impermeáveis. Através do primeiro se move a água, que se infiltra na zona de carga e é eliminada por um rio.

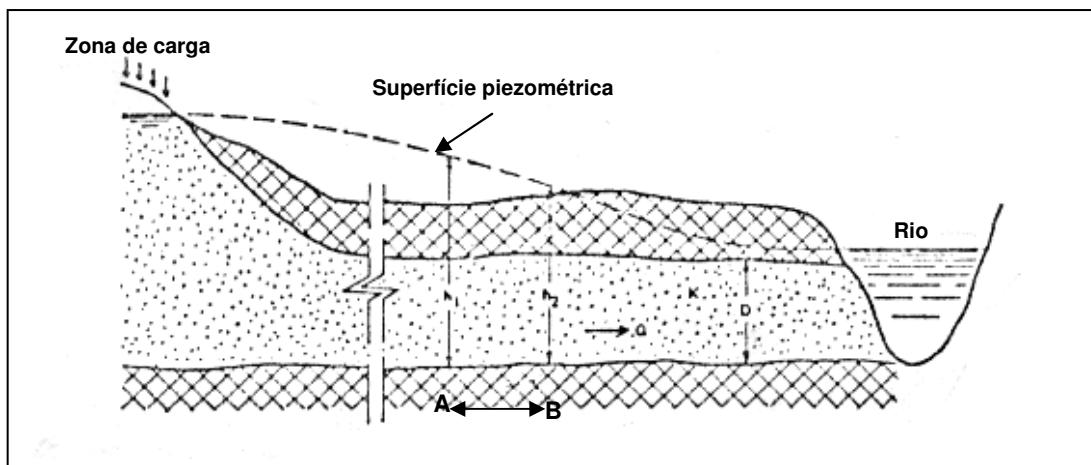


Figura 10 - Estrato permeável confinado entre dois impermeáveis.

Consideremos as seções A e B, distantes de L. Através delas, passa uma vazão Q por unidade de comprimento, perpendicular ao plano da Figura 10, conforme a Equação 17.

$$Q = q D \quad (17)$$

em que

q = fluxo (vazão por unidade de área); e,

D = espessura do estrato.

O fluxo é determinado pela Equação 18.

$$q = k \frac{h_1 - h_2}{L} = k \frac{\Delta h}{L} = k I \quad (18)$$

onde k é a condutividade hidráulica do aquífero.

Substituindo a Equação 17 na Equação 18, encontraremos a Equação 19.

$$Q = k D I \quad (19)$$

O produto $k.D$ é denominado transmissividade (T). Assim, como a condutividade hidráulica resume as propriedades transmissoras de água de um solo, a transmissividade depende da natureza do material que constitui o solo (k) e da espessura do estrato (D). Suas dimensões são $[T] = [LT^{-1}].[L] = [L^2 T^{-1}]$. A unidade mais usual para expressar transmissividade é $m^2 \text{ dia}^{-1}$.

3.4.2 - Escoamento horizontal através de vários estratos: condutividade equivalente

É freqüente um aquífero ser constituído por vários estratos de diferentes características. A Figura 11 representa o esquema de um solo com três estratos.

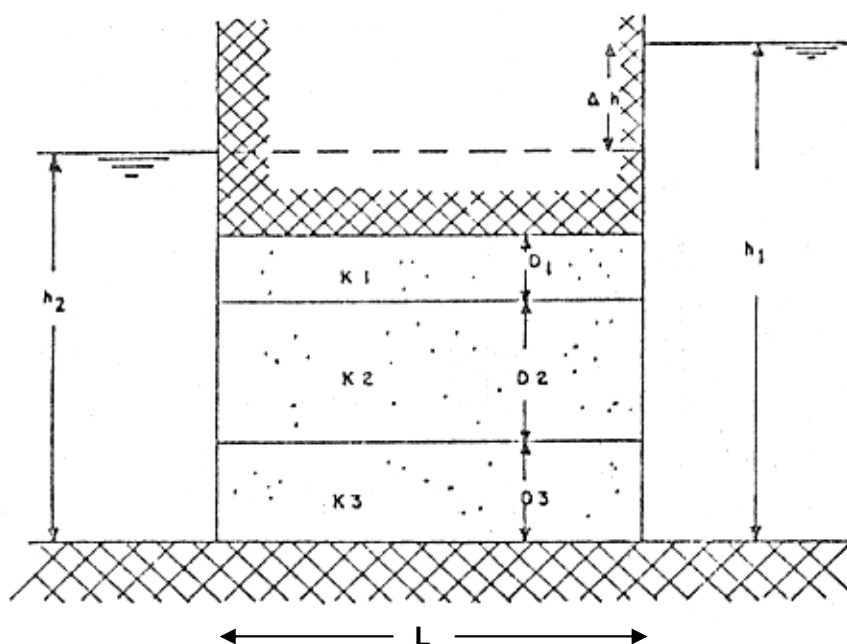


Figura 11 - Representação esquemática de um solo com três estratos

Supondo que não exista fluxo através da superfície de separação, a vazão, por unidade de comprimento, através de cada estrato é:

$$Q_1 = k_1 D_1 \frac{\Delta h}{L} \quad (20)$$

$$Q_2 = k_2 D_2 \frac{\Delta h}{L} \quad (21)$$

$$Q_3 = k_3 D_3 \frac{\Delta h}{L} \quad (22)$$

A vazão total é dada pela Equação 23.

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = \frac{\Delta h}{L} (k_1 D_1 + k_2 D_2 + k_3 D_3) \quad (23)$$

que pode ser comparada a um estrato fictício de espessura D , igual à soma das espessuras dos estratos e de permeabilidade k , representado pela Equação 24.

$$Q = \frac{\Delta h}{L} k D = \frac{\Delta h}{L} \sum k_i D_i \quad (24)$$

em que $D = \sum D_i$.

A condutividade equivalente é dada pela Equação 25.

$$k = \frac{\sum k_i D_i}{D} \quad (25)$$

3.4.3 - escoamento vertical através de um estrato: resistência hidráulica

A Figura 12 representa um estrato de permeabilidade k e espessura D , situado sobre outro de condutividade superior. Um piezômetro situado no estrato inferior indica uma carga piezométrica h_2 . Se se inunda uma parcela, mantendo água à nível constante (tabuleiro de arroz, por ex.), o nível d'água representa uma carga hidrostática h_1 , em relação à camada de impedimento. Devido à diferença $h_1 - h_2$, a água de irrigação se infiltra verticalmente (o movimento horizontal é desprezível), e segue a trajetória indicada na Figura 12.

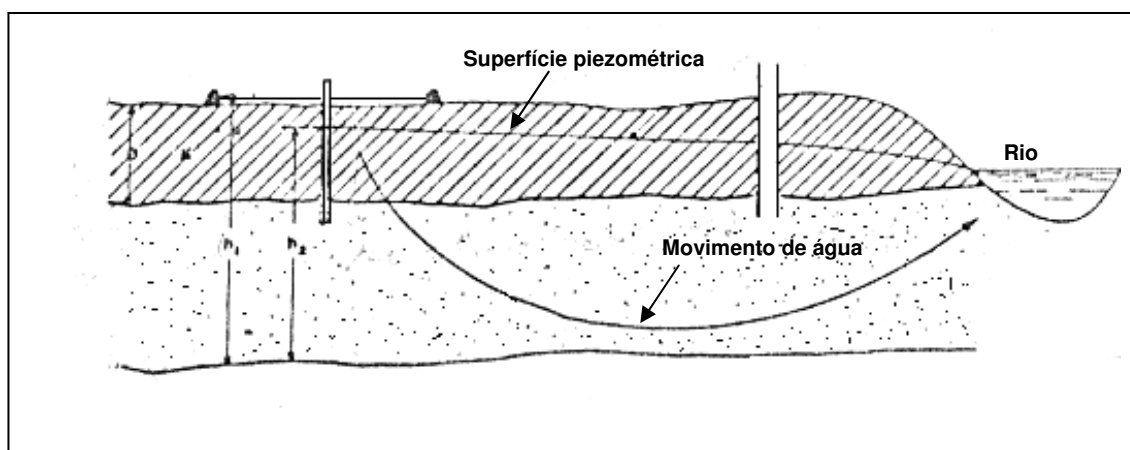


Figura 12 – Superposição de estratos onde o superior possui permeabilidade maior que o estrato situado abaixo.

Aplicando a Lei de Darcy ao estrato superior, tem-se que:

$$q = k \frac{h_1 - h_2}{D} = \frac{h_1 - h_2}{D/k} \quad (26)$$

O valor de D/k recebe o nome de resistência hidráulica do estrato (C). Suas dimensões são: $[C] = [L] [LT^{-1}]^{-1} = [T]$. k é expresso em $m \text{ dia}^{-1}$ e C em dias.

3.4.4 - Escoamento vertical através de vários estratos: permeabilidade equivalente

A Figura 13 representa um caso parecido com o do exemplo anterior, onde o estrato superior é constituído de três estratos semi-permeáveis de diferentes características.

O fluxo vertical é igual para todos os estratos, de forma que:

$$q = k_1 \frac{h_1 - h_2}{D_1}; \quad q \frac{D_1}{k_1} = h_1 - h_2 \quad (27)$$

$$q = k_2 \frac{h_2 - h_3}{D_2}; \quad q \frac{D_2}{k_2} = h_2 - h_3 \quad (28)$$

$$q = k_3 \frac{h_3 - h_4}{D_3}; \quad q \frac{D_3}{k_3} = h_3 - h_4 \quad (29)$$

Somando as equações 27, 28 e 29 e tendo em conta que:

$$(h_1 - h_2) + (h_2 - h_3) + (h_3 - h_4) = h,$$

se obtém:

$$q = \frac{\Delta h}{\frac{D_1}{k_1} + \frac{D_2}{k_2} + \frac{D_3}{k_3}} = \frac{\Delta h}{C_1 + C_2 + C_3} = \frac{\Delta h}{C} \quad (30)$$

A resistência hidráulica será: $C = C_1 + C_2 + C_3$.

O conjunto destes três estratos seria equivalente a um solo de espessura igual à soma dos três e com uma condutividade hidráulica chamada equivalente (k) e cujo valor pode ser obtido da seguinte forma:

$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

$$\frac{D}{k} = \frac{D_1}{k_1} + \frac{D_2}{k_2} + \frac{D_3}{k_3}$$

$$k = \frac{D}{\frac{D_1}{k_1} + \frac{D_2}{k_2} + \frac{D_3}{k_3}} \quad (31)$$

Generalizando, tem-se:

$$k = \frac{\sum D}{\sum \frac{D_i}{k_i}} \quad (32)$$

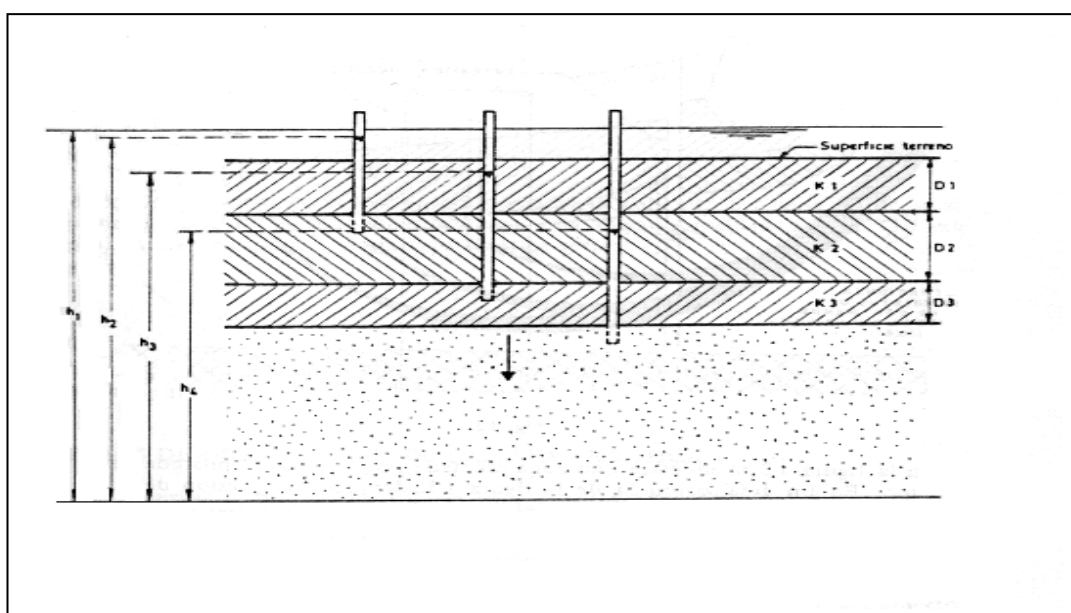


Figura 13 – Esquema mostrando o escoamento vertical através de vários estratos.

3.5 – POÇOS DE OBSERVAÇÃO DO LENÇOL FREÁTICO

A observação da profundidade do lençol freático é feita por meio de um poço simples, feito com um trado. Após a abertura do poço, é necessário esperar a estabilização do nível da água em seu interior para que a leitura seja efetuada.

Entretanto, quando for de interesse realizar observações durante um grande período de tempo, é necessário instalar um poço de observação, que requer alguns cuidados para a sua instalação. Para tanto, o fundo do poço é preenchido com material

poroso (brita ou cascalho) e, logo após, é instalado um tubo de PVC perfurado em todo o seu comprimento. A Figura 14 ilustra um poço de observação.

Uma vez colocado o tubo, toda a sua lateral é completada com brita. Na parte superior, próxima à superfície, se constrói um anel de concreto com o objetivo de aumentar a resistência e impedir que a água de chuva ou de irrigação penetre junto às paredes do tubo. O poço é coberto com uma tampa que possui uma pequena perfuração, a fim de permitir a entrada e a saída de ar, que se move devido às oscilações do nível freático.

O diâmetro do tubo depende do sistema de medida do nível, uma vez que, quanto menor o diâmetro, maior é a sensibilidade do poço, já que uma oscilação de nível de mesma quantidade, o correspondente volume de água é menor. Dessa forma, é recomendado que o diâmetro não seja menor que 5 cm, para facilitar a coleta de água. As perfurações no tubo devem ter diâmetros de aproximadamente 3 mm.

Com relação à profundidade a ser instalado, esta deve ser compatível com o objetivo do estudo a ser realizado. O poço de observação indica o nível correspondente ao estrato de maior carga hidrostática entre os perfurados. Desse modo, se se aprofundar muito o poço, pode-se atingir um aquífero artesianiano, cuja leitura não indicará a verdadeira profundidade freática. Da mesma maneira, pode-se penetrar em um estrato permeável não-saturado, o que promoveria uma perda de água do poço (funciona como dreno).

Como norma geral, utiliza-se uma profundidade igual à do sistema radicular, mais 1 (um) metro. Se com esta perfuração um estrato de características muito diferentes do superior for atravessado, é conveniente reduzir a profundidade. Se não existir esse risco, pode-se aprofundar um pouco mais.

Para comprovar se o poço funciona bem, deve-se extrair toda a água do seu interior e observar a recuperação do nível inicial. Outra maneira, mais trabalhosa, consiste na perfuração de um outro poço ao lado do poço de observação e verificar se os níveis coincidem.

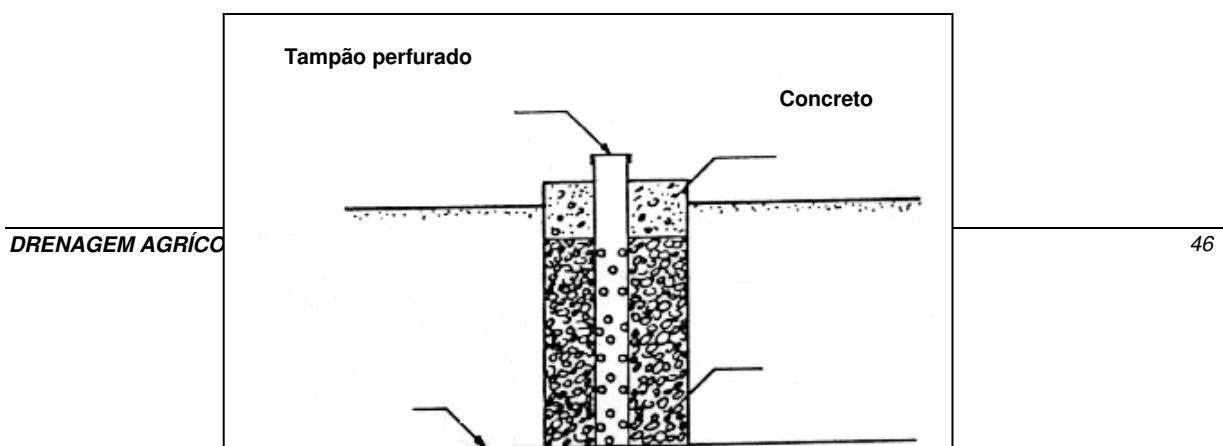


Figura 14 – Esquema de um poço de observação.

3.6 – PIEZÔMETROS

O procedimento normal de se determinar a carga hidrostática consiste na instalação de piezômetros, que são tubos com a extremidade perfurada. A Figura 15 apresenta o esquema de um piezômetro.

Os piezômetros são geralmente de PVC, os quais são recomendáveis devido ao baixo custo. Eles são introduzidos no solo de forma que a parte perfurada se situe no estrato cuja carga hidrostática se quer medir. Os diâmetros variam de 3 a 20 cm e as mesmas considerações vistas para os poços de observação são válidas também neste caso. O comprimento do estrato perfurado deve ser de, no mínimo, 1 (um) metro.

Com relação aos procedimentos de instalação, estes variam em função da maior ou menor profundidade de interesse.

Após a instalação do piezômetro, espera-se um certo tempo para que haja a estabilização no nível de água em seu interior. O nível alcançado pela água no interior do piezômetro é a carga piezométrica.

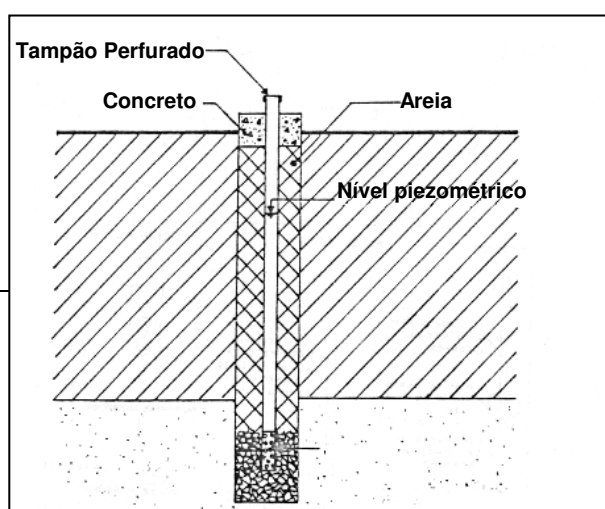


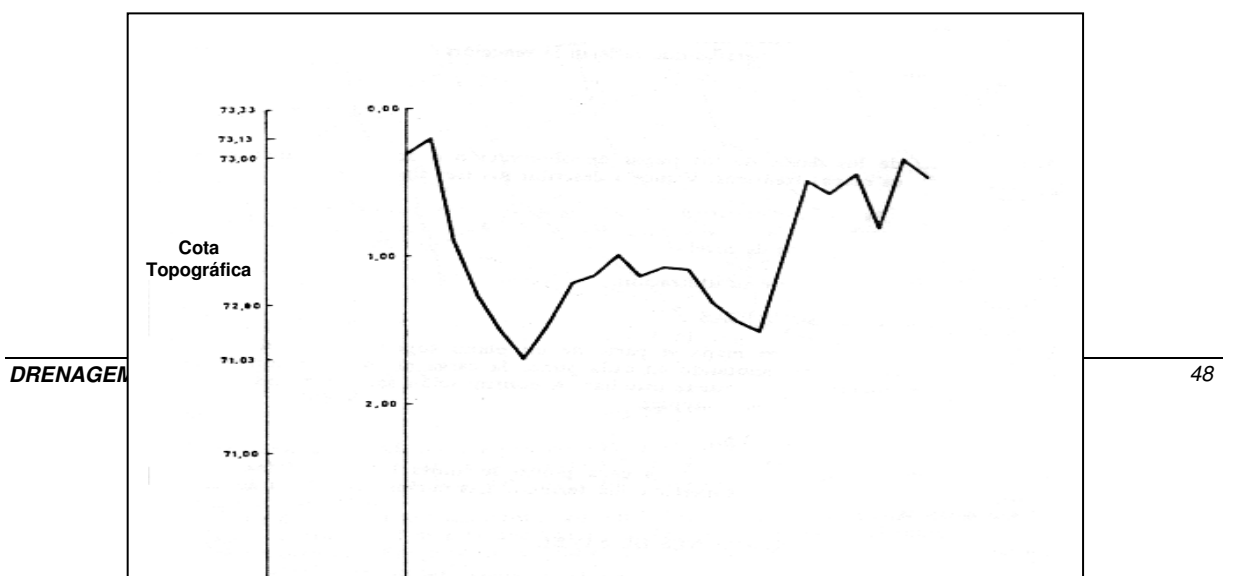
Figura 15 – Esquema de um piezômetro.

3.7 – HIDRÓGRAFAS

As hidrógrafas são curvas que relacionam as variações do nível da água em relação ao tempo. Podem ser construídas a partir dos dados de poços de observação (hidrógrafas freáticas) ou com dados de piezômetros (hidrógrafas piezométricas). No caso de hidrógrafas freáticas, pode-se tomar como referência a superfície do terreno, conforme apresentado na Figura 16.

A utilização de hidrógrafas permite os seguintes estudos:

- velocidade de elevação e descida do nível freático;
- períodos em que o nível freático alcança a zona radicular;
- fatores de carga do aquífero, analisando a variação do nível com precipitações, irrigações, bombeamentos, cheias dos rios, etc; e,
- tendência do nível freático a longo prazo.



Profundidade

Tempo

Figura 16 – Esquema de uma hidrógrafa.

3.8 – MAPAS FREÁTICOS

A partir dos dados dos poços de observação ou dos piezômetros, são construídos os mapas freáticos.

Mapa de isohypsas

Reúne curvas de mesma carga hidrostática. Para confeccioná-lo, parte-se de um plano topográfico onde estão situados os piezômetros, anotando em cada ponto a carga hidrostática correspondente ao momento em que se deseja estudar. Em seguida, traçam-se as curvas de nível, que se denominam isohypsas.

Mapa de isóbatas

Reúne curvas de mesma profundidade. Para confeccioná-lo, junto a cada ponto se anota a profundidade do lençol freático em relação à superfície do terreno. As curvas de nível são denominadas isóbatas.

Mapa de variação de nível

Este mapa pode ser construído a partir dos mapas das isohypsas ou de isóbatas. Para isto, nos dois casos, superpõem-se os mapas de duas épocas diferentes. Nos pontos de interceptação entre as curvas de nível, são anotadas as variações respectivas e, a seguir, são unidos os pontos de mesma variação por meio de uma curva.

A Figura 17 apresenta um exemplo de mapa de variação de nível, confeccionado a partir das isohypsas correspondentes aos meses de janeiro e fevereiro.

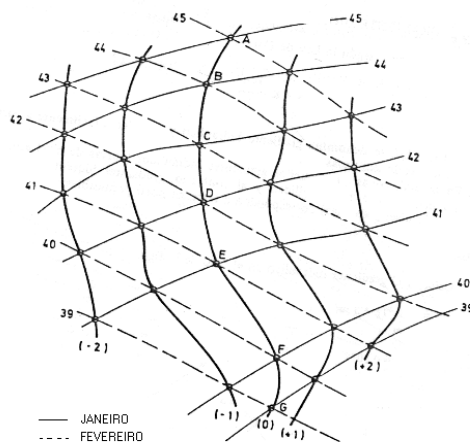


Figura 17 – Esquema de um mapa de variação de nível.

3.8.1 - Interpretação e aplicações dos mapas freáticos

3.8.1.1 - Direção do escoamento freático

Tanto as isohypsas como as isóbatas, são linhas equipotenciais. Dessa forma, as linhas normais ou perpendiculares à elas são linhas de corrente, que são definidas como as linhas traçadas em uma massa fluida onde, em todos os pontos, a direção da velocidade resultante do fluxo é tangencial à esta linha. Quando o regime é permanente, a linha de corrente é a própria trajetória de uma partícula individual do fluido.

3.8.1.2 - Gradiente Hidráulico

Usado na equação de Darcy, o gradiente hidráulico pode ser facilmente calculado a partir dos mapas das isohypsas. Em geral, terrenos que apresentam pequenos gradientes (curvas de nível bem espaçadas) tem elevada permeabilidade e, por outro lado, gradientes hidráulicos fortes, representam terrenos pouco permeáveis.

3.8.1.3 - Depressões freáticas e zonas altas

As partes altas nas superfícies piezométricas ou nos lençóis freáticos correspondem à áreas de carga do aquífero, provocada por chuvas, irrigação ou outra causa.

As depressões freáticas geralmente correspondem à áreas afetadas por bombeamento ou com rachaduras, favorecendo a eliminação da água para outros estratos. São áreas de descarga dos aquíferos.

3.8.1.4 - Influência de rios e correntes superficiais

A forma das curvas eqüipotenciais nas proximidades de rios ou de outras correntes superficiais, indica se a corrente atua como dreno (Figura 18 – A) ou carregamento do aquífero (Figura 18 - B).

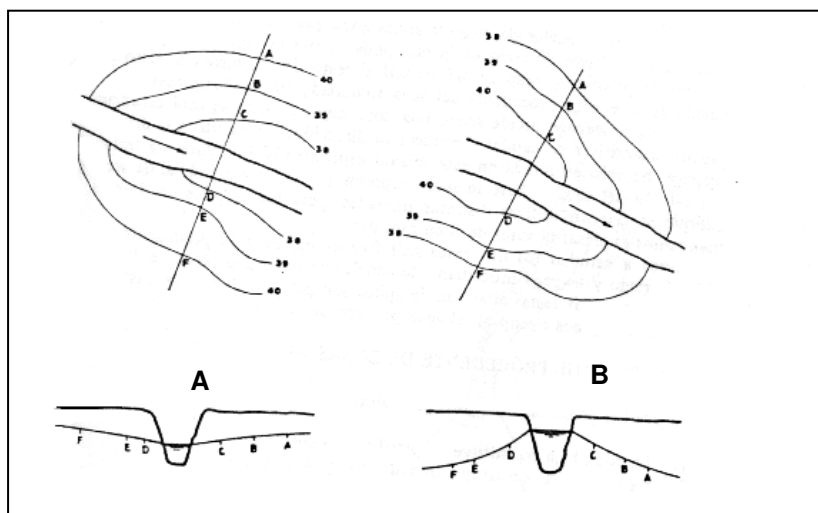


Figura 18 - Influência das curvas equipotenciais nas proximidades de rios.

3.8.1.5 - Interpretação dos mapas de variações de nível

De modo geral, as zonas de grandes variações correspondem à áreas de carga, e de pequenas variações, à áreas de descarga.

CAPÍTULO IV: DRENAGEM SUBTERRÂNEA

4.1 – INTRODUÇÃO

Também chamada drenagem do solo, a drenagem subterrânea consiste na eliminação do excesso de umidade da camada do solo onde se desenvolve o sistema radicular das plantas, por meio do rebaixamento do lençol freático.

Nas áreas em que o lençol freático está abaixo de 2 m, geralmente não há problema de drenagem. Em regiões úmidas e sem irrigação, podem ser desenvolvidas atividades agrícolas, com o lençol freático à profundidade de 60 cm sem muitos problemas. Mas em regiões áridas e semi-áridas, com irrigação e perigo de salinidade, deve-se manter o lençol freático a uma profundidade mínima de 1,8 m, para evitar problemas de salinização.

Como discutido no Capítulo 1, a drenagem do solo melhora sua aeração, aumenta o volume explorado pelas raízes, melhora sua estruturação, facilita a decomposição da matéria orgânica nele incorporada, remove o excesso de sais e permite sua mecanização.

Em alguns casos, entretanto, a melhor solução para o problema do excesso de umidade do solo é a exploração de culturas menos susceptíveis ao excesso de umidade. Mas, na maioria deles, a implantação de um sistema de drenagem é inevitável quando se quer explorar áreas com problemas de excesso de umidade.

4.2 – MOVIMENTO DE ÁGUA PARA OS DRENOS

Quando estudamos drenagem, é importante que conheçamos algumas características do movimento da água para os drenos e, em particular, as linhas de fluxo deste movimento. A Figura 19 representa um terreno com um sistema de drenos enterrados já instalados.

Devido a diferença de carga hidrostática H entre o nível do lençol freático e os drenos, a água se move em direção à eles. Este movimento afeta inclusive a água situada abaixo dos drenos, já que ela está submetida à pressão hidrostática, devido à H .

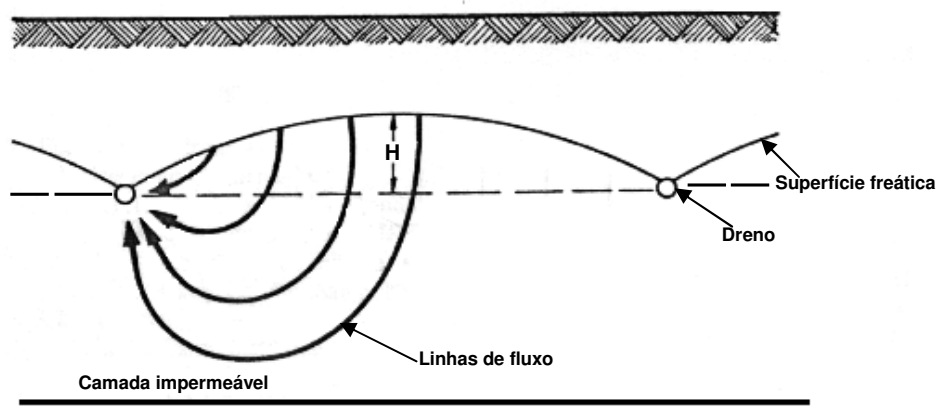


Figura 19 – Representação esquemática do movimento de água para os drenos.

Do movimento da água, pode-se destacar as seguintes características:

- o lençol freático não é uma superfície plana, mas apresenta uma curvatura, de forma que, nas proximidades do dreno, a água se encontra mais profunda que no ponto médio entre eles. Como conseqüência, a faixa de solo situada sobre os drenos, se encontra com maior índice de aeração e menos salinizada;
- como indicado na Figura 19, o movimento da água freática no solo se desenvolve na zona situada acima dos drenos e também abaixo deles. As linhas de fluxo seguem uma trajetória descendente, penetrando até certa profundidade, para depois, se dirigir aos drenos. Isto explica o fato conhecido de que a água de drenagem extrai sais de estratos situados abaixo do nível dos drenos;
- o caso em que o estrato impermeável ou camada de impedimento se encontra próxima ao fundo dos drenos, as linhas de corrente se apresentam paralelas e horizontais.

4.3 – ESPAÇAMENTO E PROFUNDIDADE DOS DRENOS

O espaçamento e a profundidade dos drenos são os dois principais parâmetros no dimensionamento de um sistema de drenagem. Normalmente, a profundidade é fixada, determinando-se o espaçamento adequado para os drenos. Esses dois parâmetros dependem do tipo de solo, da quantidade de água a ser drenada (recarga) e da profundidade do solo que se deseja drenar.

Como indicação geral para efeitos práticos, a Tabela 7 apresenta valores médios de espaçamento e profundidade de drenos, em função da condutividade hidráulica, que podem ser utilizados, quando da impossibilidade de determiná-los.

Tabela 7 – Valores indicativos da profundidade e espaçamento de drenos

Tipo de Solo	Condutividade hidráulica (mm dia⁻¹)	Espaçamento (m)	Profundidade (m)
Textura fina	< 1,5	10 a 20	1,0 a 1,5
Textura média	1,5 a 5,0	15 a 25	1,0 a 1,5
	5,0 a 20,0	20 a 35	1,0 a 1,5
	20,0 a 65,0	30 a 40	1,0 a 1,5
Textura grossa	65,0 a 125,0	30 a 70	1,0 a 2,0
Turfa	125,0 a 250,0	30 a 100	1,0 a 2,0

A determinação do espaçamento e da profundidade dos drenos pode ser feita por método direto ou por método indireto, utilizando fórmulas empíricas ou teorias de drenagem.

4.3.1 – Método direto

Consiste na determinação *in loco* da declividade da linha de efeito útil de drenagem do solo, a qual deverá ser determinada na área a ser drenada, por meio de um dreno aberto e uma série de poços, instalados na direção perpendicular à este, conforme ilustrado na Figura 20. A água no dreno deve ser bombeada ou derivada por gravidade, para fora da área, para propiciar o rebaixando do lençol freático.

De acordo com a Figura 20, verifica-se que o nível de água no poço mais próximo do dreno é inferior ao do poço seguinte. Quando o nível de água tornar-se constante em dois poços subsequentes, o dreno não é mais capaz de drenar a região onde

encontram-se esses poços. Unindo os níveis de água nos poços, tem-se a declividade da linha de efeito útil de drenagem.

Conhecendo-se essa linha, facilmente pode-se determinar qual deverá ser o espaçamento dos drenos, para uma determinada profundidade mínima do lençol entre eles. Definida a profundidade de solo que se deseja drenar, verifica-se o poço que registra essa profundidade, definindo-se, dessa forma, o ponto médio entre o espaçamento dos drenos. Após instalado o sistema de drenagem, a profundidade mínima real do lençol será um pouco maior do que a profundidade mínima preestabelecida, uma vez que o lençol freático, na posição intermediária entre os drenos, estará sob a ação dos dois e não apenas de um dreno.

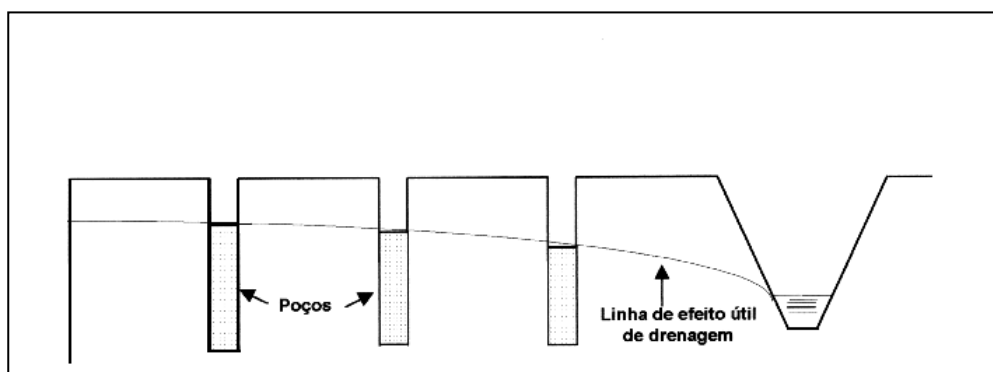


Figura 20 – Determinação do espaçamento de drenos pelo método de campo.

4.3.2 – Teorias de drenagem – Fórmulas empíricas

A finalidade básica das fórmulas de drenagem é a determinação do espaçamento de drenos. Este espaçamento, é condicionado aos seguintes fatores:

- profundidade dos drenos;
- condutividade hidráulica dos solos;
- espessura dos estratos do solo;
- profundidade ótima do lençol freático;
- vazão de escoamento.

As fórmulas de drenagem são agrupadas em duas categorias: as de **regime permanente** e as de **regime variável**.

Nas fórmulas de regime permanente, a suposição básica é de que a superfície do lençol freático se encontra estabilizada no tempo e no espaço, isto é, a quantidade de água que chega até ele é igual à quantidade que é eliminada pela drenagem. Esta situação corresponde ao caso de uma precipitação de intensidade constante e de longa duração. Em países de clima tropical, como o Brasil, os regimes pluviométricos não têm essa característica. Essas fórmulas são de boa aproximação para regiões que apresentam regime pluviométrico regular e bem distribuído ao longo do ano.

Duas condições são impostas ao funcionamento do sistema de drenagem, cujo dimensionamento baseia-se nas fórmulas de regime permanente. Estas condições denominam-se critérios de drenagem, isto é, a lâmina de água a ser eliminada em 24 horas (coeficiente de drenagem) e a profundidade à qual o lençol freático deve estabilizar-se.

Nas fórmulas de regime variável, supõe-se que, em consequência de uma chuva ou de uma irrigação, o lençol freático eleva-se a uma certa altura, em relação ao seu nível inicial, e depois de cessada a chuva ou a irrigação, ele começa a rebaixar. Os critérios de drenagem, para este caso, são estabelecidos em termos dinâmicos, e compreendem os casos de critérios de drenagem para o período seco do ano ou de irrigação e critérios de drenagem para o período chuvoso. Ambos os casos levam em conta a velocidade de queda do lençol freático.

4.3.2.1 – Fórmulas de regime permanente

Existem várias fórmulas ou teorias para se determinar a relação entre o espaçamento e a profundidade dos drenos, baseadas no regime de escoamento permanente. Entretanto, serão estudadas as duas mais utilizadas: a de **Hooghoudt** e a de **Ernst**.

Na dedução dessas duas fórmulas, foi pressuposto que:

- o solo é homogêneo e de condutividade hidráulica k_0 ;
- os drenos são paralelos e espaçados de L ;

- há uma camada impermeável (C.I.) à uma distância vertical, D, abaixo da linha dos drenos;
- a recarga do lençol freático, isto é, a percolação, R, é constante;
- a origem do sistema de eixos coordenados está na interseção da camada impermeável com o plano vertical que passa pelo centro de um dos drenos; e
- o gradiente hidráulico, em qualquer ponto dentro da região de escoamento, saturada, é igual à declividade do lençol freático acima dele, isto é, dy/dx. Esta pressuposição está baseada nas hipóteses de Dupuit-Forchheimer (D-F) que desconsideram a convergência das linhas de corrente para os drenos, ou seja, o escoamento para pequenas declividades do lençol freático pode ser considerado horizontal e a velocidade da água é constante, em qualquer ponto sobre um plano vertical à direção do escoamento.

Forma da Equação de Hooghoudt

$$L^2 = \frac{4 k H^2 + 8 k D H}{R} \quad (33)$$

Hooghoudt encontrou uma maneira prática para introduzir o efeito da convergência das linhas de corrente, próximo aos drenos, trocando na Equação 33 o valor da espessura do estrato, D, por um valor teórico denominado de estrato equivalente, d, em que $d < D$. Este estreitamento teórico da região de escoamento, abaixo dos drenos, cria uma perda de carga, para efeito de dimensionamento, equivalente àquela devida à convergência das linhas de corrente, junto aos drenos, não considerada na Equação 33, a qual passa a ser escrita.

$$L^2 = \frac{4 k H^2 + 8 k d H}{R} \quad (34)$$

Para um solo estratificado em duas camadas de condutividades hidráulicas k_1 e k_2 e, ainda, que os drenos estejam contidos na interface destas duas camadas, a Equação 34 torna-se:

$$L^2 = \frac{4 k_1 H^2}{R} + \frac{8 k_2 d H}{R} \quad (35)$$

que é a forma geral da equação de Hooghoudt.

A Equação 35 expressa melhor o espaçamento para $D > \frac{1}{4} L$, mas também pode ser usada quando $D < \frac{1}{4} L$.

A Equação que determina o valor do estrato equivalente de Hooghoudt, d , depende do espaçamento (L), do perímetro molhado (P_m) e da espessura do estrato entre drenos e a camada impermeável (D), ou seja:

$$d = \frac{D}{2,5 \frac{D}{L} \text{LN}\left(\frac{D}{P_m}\right) + 1} \quad (36)$$

Como os drenos são dimensionados para trabalharem à meia carga (o volume de água a ser drenado ocupa apenas a metade do diâmetro), o perímetro molhado será determinado por:

$$P_m = \pi r \quad (37)$$

em que r é o raio interno dos drenos.

Exemplo de aplicação do método de Hooghoudt

Determinar o espaçamento que deverão ter os drenos de uma rede de drenagem subterrânea, sabendo-se que:

- condutividade hidráulica da camada superior do solo (k_1): $0,25 \text{ m dia}^{-1}$;
- condutividade hidráulica da camada inferior do solo (k_2): $1,50 \text{ m dia}^{-1}$;
- culturas: hortaliças $\Rightarrow p = 0,50$ a $0,80 \text{ m}$ (Tabela 2);
- lâmina a ser eliminada ou recarga (R): 15 mm dia^{-1} ;
- distância dos drenos à camada impermeável (D): 2 m ;
- raio dos drenos (r): 5 cm .

Considerando que o sistema será dimensionado para o valor máximo da profundidade ótima do lençol freático para o grupo de culturas em questão ($p = 0,80$ m), a profundidade dos drenos (P) será atribuída como sendo igual a 1,20 m (é comum se estipular $P \geq 1,5 p$).

De acordo com as equações 35 e 36, verifica-se que a determinação do espaçamento (L) só pode ser feita por tentativas. Sendo assim, atribui-se um valor inicial para L e calcula-se d , por meio da Equação 36. Com o valor de d , calcula-se L , por meio da Equação 35. Compara-se o valor atribuído com o valor calculado; se forem iguais, chegou-se ao valor definitivo de L ; se forem diferentes, atribui-se novo valor a L , calculando-se novamente d e, conseqüentemente, L . O cálculo só se encerra, quando o valor atribuído a L for igual ao calculado.

Primeira tentativa: $L = 40$ m

a - Determinação da altura máxima do lençol freático sobre o plano que passa pelo fundo dos drenos (H);

$$H = P - p = 1,20 - 0,80 = 0,40 \text{ m}$$

b - Determinação do estrato equivalente de Hooghoudt (d)

Para:

$$L = 40 \text{ m}$$

$$P_m = \pi r = 3,14 \times 0,05 = 0,157 \text{ m}$$

$$D = 2 \text{ m}$$

$$d = \frac{D}{2,5 \frac{D}{L} \text{LN}\left(\frac{D}{P_m}\right) + 1} = \frac{2}{2,5 \frac{2}{40} \text{LN}\left(\frac{2}{0,157}\right) + 1} = 1,52 \text{ m}$$

c - Determinação do espaçamento (L)

$$L^2 = \frac{4 k_1 H^2}{R} + \frac{8 k_2 d H}{R} = \frac{4 \times 0,25 \times (0,40)^2}{0,015} + \frac{8 \times 1,50 \times 1,52 \times 0,40}{0,015} = 497$$

$$L = 22,3 \text{ m}$$

Como o valor atribuído foi de 40 m, o ajuste não está adequado.

Segunda tentativa: L = 30 m

Será calculado um novo valor de d.

Para:

$$L = 30 \text{ m}$$

$$Pm = \pi r = 3,14 \times 0,05 = 0,157 \text{ m}$$

$$D = 2 \text{ m}$$

O valor de d será então igual a 1,40 m.

Para este valor de d, o valor de L é 21,4 m.

Como o valor atribuído foi 30 m, o espaçamento ainda não está ajustado.

Terceira tentativa: L = 20 m

Será calculado um novo valor de d.

Para:

$$L = 20 \text{ m}$$

$$Pm = \pi r = 3,14 \times 0,05 = 0,157 \text{ m}$$

$$D = 2 \text{ m}$$

O valor de d será então igual a 1,22 m. Para este valor de d, o valor de L é 20 m

Como o valor atribuído foi 20 m, o espaçamento está ajustado.

4.3.2.2 – Fórmulas de regime variável

Estas fórmulas consideram o movimento do lençol freático tanto durante a carga do aquífero como durante a descarga.

Os critérios de drenagem para o regime variável se fundamentam no fato de que o lençol freático se eleva em consequência de uma chuva ou irrigação e, em seguida, estabelecem a velocidade de queda do lençol, isto é, o número de dias para que ele atinja uma dada profundidade. Basicamente, são dois os critérios de drenagem para o regime variável: critérios de drenagem para a época de irrigação e critérios de drenagem para a época de chuvas. Estes critérios já foram discutidos no capítulo 1, item 1.9.

Com referência à chuva crítica, utilizada no critério de época de chuvas, existem várias metodologias para sua determinação. A seguir, será apresentada uma dessas metodologias.

Inicialmente, dispõem-se os dados em ordem decrescente, atribuindo-lhes uma ordem de apresentação, conforme coluna 1 da Tabela 8. Na coluna 2, os registros de chuvas são agrupados em intervalos de 5 em 5 mm, e na coluna 3 são anotados o número de vezes que cada evento ocorreu, com a finalidade de determinar a freqüência da chuva (coluna 4), obtida por meio da Equação 44.

$$F_i = \frac{N_i}{\sum N_i} \quad (44)$$

em que $\sum N_i$ é o número total de dias analisados.

O cálculo da freqüência com a qual a chuva foi igualada ou superada (coluna 5) é feito, somando-se todas as freqüências para chuvas iguais ou maiores à considerada. O período de retorno (T) (coluna 6) é o inverso da freqüência. O número de vezes que uma certa chuva é esperada ocorrer anualmente (N) (coluna 7), é determinado pela razão entre o número de dias do ano e o período de retorno da chuva ($365/T$).

No exemplo em questão, apresentado na tabela 7, a chuva crítica ou de projeto, determinada com dados de 15 anos de observação, está entre 40 e 45 mm dia⁻¹, uma vez que é para essa faixa que $N = 4,8545 \cong 5$.

Tabela 7 – Determinação de chuva crítica ou de projeto

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
i	$a_i < P_i < b_i$	N_i	$F_i = \frac{N_i}{\sum N_i}$	$F_j = \frac{M_j}{\sum N_i}$	$\frac{1}{(5)}$	$\frac{365}{(6)}$
1	0	3805	0,6966	1,000	1,0000	365,0000
2	0-5	965	0,1767	0,3034	3,2959	110,7410
3	5-10	215	0,0393	0,1267	7,8927	46,2455
4	10-15	141	0,0258	0,0874	11,4416	31,9010
5	15-20	90	0,0165	0,0616	16,2338	22,4840
6	20-25	66	0,0121	0,0451	22,1729	16,4615
7	25-30	43	0,0078	0,0330	30,3030	12,0450
8	30-35	38	0,0070	0,0252	39,6825	9,1980
9	35-40	27	0,0049	0,0182	54,9450	6,6430
10	40-45	18	0,0033	0,0133	75,1879	4,8545
11	45-50	15	0,0027	0,0100	100,0000	3,6500
12	50-55	7	0,0013	0,0073	136,9863	2,6645
13	55-60	3	0,0005	0,0060	166,6666	2,1900
14	60-65	2	0,0004	0,0055	181,8181	2,0075
15	65-70	3	0,0005	0,0051	196,0784	1,8615
16	70-75	5	0,0009	0,0046	217,3913	1,6790
17	75-80	4	0,0007	0,0037	270,2702	1,3505
18	80-85	1	0,0002	0,0030	333,3333	1,0950
19	85-90	2	0,0004	0,0028	357,1429	1,0220
20	90-95	1	0,0002	0,0026	384,6154	0,9490
21	95-100	1	0,0002	0,0024	416,6666	0,8760
22	100-105	0	0,0000	0,0020	500,0000	0,7300
23	105-110	2	0,0004	0,0020	500,0000	0,7300
24	110-115	1	0,0002	0,0016	625,0000	0,5840
25	115-120	0	0,0000	0,0014	714,2857	0,5110
26	120-125	1	0,0002	0,0014	714,2857	0,5110
27	125-130	0	0,0000	0,0012	833,3333	0,4380
28	130-135	0	0,0000	0,0012	833,3333	0,4380
29	135-140	1	0,0002	0,0012	833,3333	0,4380
30	140-145	1	0,0002	0,0010	1000,0000	0,3650
31	145-150	2	0,0004	0,0008	1250,0000	0,2950
32	150-155	2	0,0004	0,0004	2500,0000	0,1460

Existem várias fórmulas ou teorias de drenagem, baseadas no regime variável, desenvolvidas para se determinar a relação entre o espaçamento e a profundidade dos drenos. Dentre elas, será considerada apenas a de **Glover-Dumm** por se tratar de uma

fórmula de fácil aplicação e que tem se mostrado eficiente nos experimentos conduzidos em condições de laboratório e de campo.

Na **fórmula de Glover-Dumm**, considera-se que a carga do aquífero é instantânea, isto é, não se leva em consideração a água que sai pelos drenos durante a chuva ou a irrigação. Isto significa ainda que, para uma recarga R , que se infiltrou completamente, o lençol freático elevar-se-á; cessada a precipitação, o nível do lençol começa a rebaixar.

A Figura 22 representa um terreno onde foi instalado um sistema de drenagem.

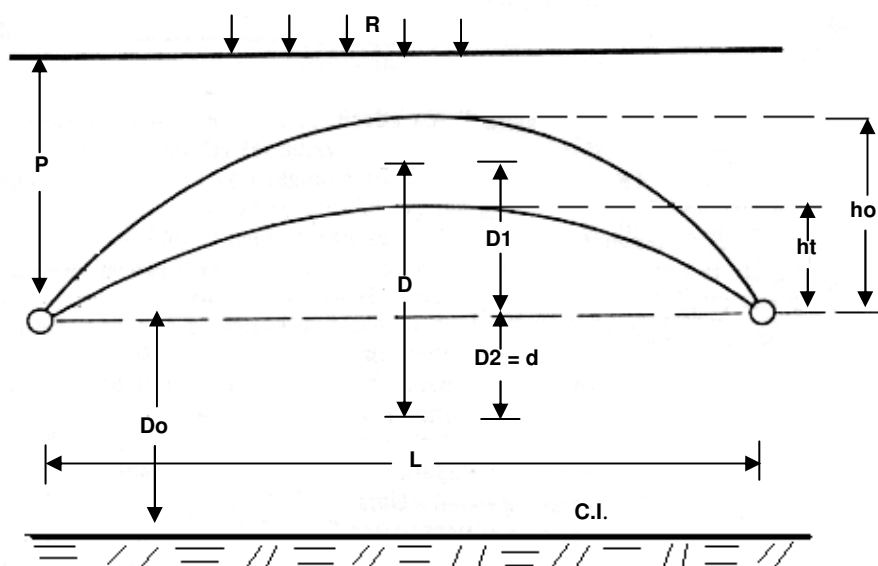


Figura 22 – Representação esquemática de um dreno com os parâmetros necessários à aplicação da equação de Glover-Dumm.

Após uma carga instantânea (R), procedente de uma irrigação, o lençol freático, que inicialmente se supõe que é horizontal e se encontra no nível dos drenos, se eleva até uma altura h_0 , dada pela Equação 45.

$$h_0 = \frac{R}{\mu} \quad (45)$$

em que

R = recarga [mm]; e

μ = macroporosidade do solo [decimal], determinada em laboratório ou estimada pela Equação 46.

$$\mu = \sqrt{k} \quad (46)$$

em que k é a condutividade hidráulica do solo [cm dia^{-1}].

Atingida a altura h_0 , o lençol freático começa a se rebaixar e, após um tempo t atinge uma altura h_t .

Partindo de uma série de hipóteses, Glover-Dumm estudaram o movimento do lençol freático e deduziram a Equação 47.

$$L^2 = \pi^2 \frac{k D t}{\mu} \frac{1}{\ln 1,16 \frac{h_0}{h_t}} \quad (47)$$

em que

L = espaçamento dos drenos [m];

K D = transmissividade [$\text{m}^2 \text{dia}^{-1}$];

t = tempo transcorrido a partir do momento que o lençol freático começou a descer [dias];

h_0 = altura inicial sobre o nível dos drenos [m]; e,

h_t = altura sobre o nível dos drenos após um tempo t [m].

A altura sobre o nível dos drenos após um tempo t [h_t], é determinada pela Equação 48.

$$h_t = 1,16 h_0 e^{-\alpha t} \quad (48)$$

em que α é o fator de reação do solo [dia^{-1}], que reúne os fatores de solo e geométricos, determinado pela Equação 49.

$$\alpha = \frac{\pi^2 k D}{\mu L^2} \quad (49)$$

A determinação de D é feita pela Equação 50.

$$D = D_1 + D_2 \quad (50)$$

O valor de D_2 corresponde ao estrato equivalente de Hooghoudt (d), visto no item anterior. Pela Figura 22, vê-se que D_1 pode ser aproximado por:

$$D_1 = \frac{h_o + h_t}{2} \quad (51)$$

Embora a fórmula de Glover-Dumm esteja fundamentada nas hipóteses de D - F, ela leva em consideração o efeito de convergência das linhas de fluxo, próximo aos drenos, com a introdução de D_2 no lugar de D_o .

Aplicação da equação de Glover-Dumm para época de irrigação

Nos perímetros irrigados, a lâmina de irrigação, IRN (irrigação real necessária), deve satisfazer a demanda evapotranspirométrica (água retida na zona radicular) e a necessidade de controle da salinidade do solo (água de lixiviação ou percolação).

A determinação do espaçamento para uma dada profundidade dos drenos é feita por tentativas, à exemplo da equação de Hooghoudt. O procedimento para essa determinação está a seguir.

1. Determinação da altura máxima que o lençol freático deverá ter, n dias após a irrigação, pela relação:

$$h_n = P - p$$

em que

P = profundidade dos drenos [m]; e,

p = profundidade mínima do lençol freático para a cultura [m].

2. Determinação da altura do lençol freático, ocasionada pela primeira irrigação, por meio da Equação 45.
3. Determinação da espessura do estrato equivalente ($D_2 = d$). Este parâmetro é função de L , raio do dreno (r) e de D_0 . Seu cálculo é feito por meio das equações 42 e 43. Nesta etapa, atribui-se um valor para o espaçamento.
4. Determinação de h_t para o turno de rega estabelecido, por meio da Equação 48.
5. Determinação do valor de α (Equação 49).
6. Determinação do valor de D_1 (Equação 51).
7. Determinação do valor de D (Equação 50).
8. Determinação da altura de estabilização do lençol freático após n irrigações. Se o turno de rega é de t dias, antes da irrigação seguinte o lençol freático se rebaixará até uma certa altura, que é calculada pela Equação 48. Após a nova irrigação, o lençol freático se elevará novamente de h_0 , só que agora não mais partindo do nível dos drenos e sim, da altura que ele se encontrava antes da irrigação. Repete-se esse procedimento até se encontrar um valor constante para h_0 .
9. Calcula-se o h_t , n dias após a irrigação, de acordo com o critério estabelecido, utilizando-se o valor de h_0 constante encontrado no item anterior, e com t igual a n dias.
10. Se o h_t calculado for igual à h_n (item 1), o espaçamento está adequado; se for maior, o espaçamento adotado está excessivo e, se for menor, está pequeno. Nestes dois últimos casos, retorna-se ao item 3, atribui-se um novo espaçamento e repete-se os itens subsequentes, até encontrar o espaçamento adequado.

Aplicação da equação de Glover-Dumm para época de chuva

Este critério determina as profundidades a que o lençol freático deve estar nos dias subsequentes à ocorrência da chuva crítica.

Inicia-se o cálculo, obtendo-se o valor da chuva crítica. Em geral, considera-se que, por ocasião dessa chuva, o solo está na capacidade de campo e que toda água será infiltrada no solo. Isto significa igualar a lâmina de percolação, R , à lâmina da chuva crítica, proporcionando, dessa forma, uma grande margem de segurança ao cálculo.

O procedimento para o cálculo é o mesmo que foi utilizado para época de irrigação, utilizando-se a chuva crítica para o cálculo de h_0 e o critério de drenagem para época de chuva.

O espaçamento definitivo a ser adotado no projeto será aquele de maior exigência, ou seja, o menor entre os dois critérios.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO MÉTODO DE GLOVER-DUMM

Para a execução de um projeto de drenagem subterrânea para uma área de 29,83 ha (380 x 785 m), foram levantados os seguintes dados:

- solo: textura média;
- condutividade hidráulica média do perfil do solo: $1,13 \text{ m dia}^{-1}$;
- profundidade da camada impermeável: 3,20 m;
- cultivos intensivos;
- turno de rega: 6 dias;
- lâmina de irrigação a ser aplicada: 80 mm;
- recarga prevista: perdas da ordem de 25% da lâmina bruta;
- chuva crítica calculada para o local: 42 mm;
- diâmetro dos drenos laterais: 6”;

Diante desses dados, determine o espaçamento mais adequado para a drenagem da área, utilizando o método de GLOVER-DUMM.

Resolução

1) Dimensionamento para época de irrigação

1.1 – Determinação de h_n

Considerando o critério de drenagem para época de irrigação:

Culturas	p (m)
Pastagem ⁽¹⁾	
- solos de textura fina	0,70
- solos arenosos	0,50
Hortaliças ⁽²⁾	0,50 – 0,80
Cultivos extensivos ⁽²⁾	0,90 – 1,20
Frutíferas ⁽²⁾	1,50

(1) N = 4 dias

(2) N = 3 dias

Para o problema em questão, vamos considerar os valores de p equivalentes à hortaliças. Considerando o valor máximo, vamos ter que $p = 0,80$ m. A profundidade de instalação dos drenos será então igual a 1,20 m (considerando que $P = 1,5 p$).

Três dias após a irrigação, a altura máxima que o lençol freático deverá estar sobre os drenos será:

$$h_3 = P - p$$

$$h_3 = 1,20 - 0,80 = 0,40 \text{ m}$$

1.2 – Determinação de h_0

Para esta determinação é necessário se determinar a recarga (R) para os drenos bem como a macroporosidade do solo (μ) em questão. Assim:

$$\mu = \sqrt{k}$$

$$\mu = \frac{\sqrt{113}}{100} = 0,106$$

Da dose de rega total (80 mm), 25% serão perdidos por percolação (20 mm). Assim, após a primeira irrigação, a altura freática sobre os drenos será:

$$h_0 = \frac{R}{\mu} = \frac{0,02}{0,106} = 0,19 \text{ m}$$

1.3 – Determinação de D_2

Primeira tentativa: $L = 50$ m.

Para uma profundidade de 3,2 m da camada impermeável, e como a profundidade de instalação dos drenos é de 1,20 m, o valor de D_0 será de 2 m. Para drenos tubulares com diâmetro de 6" (0,15 m), o raio será igual a 0,075 m. Assim, o valor de D_2 será:

$$D_2 = d = \frac{D_0}{2,5 \frac{D_0}{L} \text{LN} \left(\frac{D_0}{P_m} \right) + 1} = \frac{2}{2,5 \frac{2}{50} \text{LN} \left(\frac{2}{3,14 \times 0,075} \right) + 1} = 1,648 \text{ m}$$

1.4 – Determinação de D_1

$$D_1 = \frac{h_0 + h_t}{2} = \frac{0,19 + 0}{2} = 0,095 \text{ m}$$

1.5 – Determinação de D

$$D = D_1 + D_2 = 0,095 + 1,648 = 1,743 \text{ m}$$

1.3 – Determinação do fator de reação (α)

$$\alpha = \frac{\pi^2 k D}{\mu L^2} = \frac{3,14^2 \times 1,13 \times 1,743}{0,106 \times 50^2} = 0,073$$

Primeira irrigação

Logo após a primeira irrigação, a altura freática (h_0) será de 0,19 m. Para se determinar a altura do lençol freático antes de se aplicar a segunda irrigação, ou seja, 6 dias após a primeira (intervalo equivalente ao turno de rega), calcula-se o valor de αt .

$$\alpha t = 0,073 \times 6 = 0,438.$$

Para $\alpha t > 0,2$ pode-se utilizar a equação simplificada para o cálculo de h_t .

$$h_t = 1,16 h_0 e^{-\alpha t}$$

$$h_t = 1,16 \times 0,19 \times e^{-0,438} = 0,14 \text{ m}$$

Segunda irrigação

Ao se iniciar a segunda irrigação, o lençol freático se encontrará a uma altura de 0,14 m. Como a irrigação provoca uma elevação de 0,19 m, o valor de h_0 será de 0,33 m (0,14 + 0,19 m). Assim, a altura do lençol freático antes de se aplicar a terceira irrigação será:

$$h_t = 1,16 h_0 e^{-\alpha t}$$

$$h_t = 1,16 \times 0,33 \times e^{-0,438} = 0,25 \text{ m}$$

1.6 – Altura de estabilização do lençol freático

Continuando o cálculo para as irrigações seguintes:

Nº da irrigação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
H antes da irrigação	0,00	0,14	0,25	0,33	0,39	0,43	0,46	0,49	0,51	0,52	0,53	0,54	0,55	0,55
H depois da irrigação	0,19	0,33	0,44	0,52	0,58	0,62	0,65	0,68	0,70	0,71	0,72	0,73	0,74	0,74

Uma vez alcançado o equilíbrio, calcula-se a altura freática correspondente a 3 dias após a irrigação ($t = 3$ dias). que é o que realmente interessa para atender o

$$\alpha t = 0,073 \times 3 = 0,219 \text{ que é } > 0,2.$$

O valor de h_t para 3 dias será:

$$h_t = 1,16 \times 0,74 \times e^{-0,219} = 0,69 \text{ m}$$

Como a altura máxima que o lençol freático deverá estar sobre os drenos é igual a 0,40 m, o espaçamento de 50 m está excessivo.

Segunda tentativa: $L = 40$ m

Para essa condição teremos:

- $h_0 = 0,19$ m
- $D_2 = 1,578$ m
- $D_1 = 0,095$ m
- $D = 1,673$ m
- $\alpha = 0,11$
- $\alpha t = 0,11 \times 6 = 0,66$
- $h_t = 1,16 \times 0,19 \times e^{-0,66} = 0,11$ m

Nº da irrigação	1	2	3	4	5	6	7	8	9
H antes da irrigação	0,00	0,11	0,18	0,22	0,25	0,26	0,27	0,28	0,28
H depois da irrigação	0,19	0,30	0,37	0,41	0,44	0,45	0,46	0,47	0,47

- o valor de αt para 3 dias será: $\alpha t = 0,11 \times 3 = 0,33$

- o valor de h_t para 3 dias será:

$$h_t = 1,16 \times 0,47 \times e^{-0,33} = 0,39 \text{ m}$$

Verifica-se que 0,39 m é aproximadamente igual a altura máxima admissível (0,40 m). Conclui-se, com isso, que o espaçamento de 40 m está adequado para a época de irrigação.

2) Dimensionamento para época de chuva

2.1– Determinação de h_0

Considerando o critério de drenagem para época de chuva:

Dias depois da chuva	Profundidade freática (p)		
	Classe A	Classe B	Classe C
0	0,30	0,50	0,90
1	0,50	0,80	1,10
2	0,70	1,00	1,30
3	0,80	1,10	1,40

Classe A: pastagens e grande parte das hortaliças

Classe B: culturas extensivas

Classe C: frutíferas

Para o problema em questão, teremos a classe A e as alturas freáticas em relação aos drenos serão:

Profundidade dos drenos: 1,20 m

Dias depois da chuva	Profundidade freática (p) Classe A	Altura do lençol freático em relação aos drenos (h_t)
0	0,30	0,90
1	0,50	0,70
2	0,70	0,50
3	0,80	0,40

2.2 – Determinação de h_0

$$h_0 = \frac{R}{\mu} = \frac{0,042}{0,106} = 0,40 \text{ m}$$

Vê-se que este valor é inferior à correspondente as alturas para 0, 1 e 2 dias após a chuva. Vejamos o que ocorre 3 dias após a chuva.

2.3 – Determinação de D_2

Para o mesmo espaçamento calculado para a época de irrigação, ou seja, $L = 40 \text{ m}$, o valor de D_2 será de 1,578 m

2.4 - Determinação de D_1 : calculado como sendo a média entre h_0 (0,40 m) e o valor de h_t para 3 dias (0,40 m) – ver tabela anterior. Como os valores são iguais, $D_1 = 0,40 \text{ m}$.

2.5 - Determinação de D

$$D = D_1 + D_2 = 0,40 + 1,5578 = 1,98 \text{ m}$$

2.6 - Determinação do fator de reação (α)

$$\alpha = \frac{\pi^2 K D}{\mu L^2} = \frac{3,14^2 \times 1,13 \times 1,98}{0,106 \times 40^2} = 0,13$$

2.7 – Determinação de αt

Como estamos utilizando 3 dias após a chuva, teremos:

$$\alpha t = 0,13 \times 3 = 0,39$$

Para $\alpha t > 0,2$ pode-se utilizar a equação simplificada para o cálculo de h_t .

$$h_t = 1,16 h_0 e^{-\alpha t}$$

$$h_t = 1,16 \times 0,40 \times e^{-0,39} = 0,31 \text{ m}$$

Esta altura freática (0,31 m) é menor do que a altura máxima admissível (0,40 m) e, dessa forma, o espaçamento de 40 m poderia ser aumentado. Como o espaçamento adequado é aquele que atende tanto o critério de época de irrigação quanto o de chuva, conclui-se que **40 m** é o espaçamento definitivo.

4.3.2.3 – Dimensionamento dos drenos

4.3.2.3.1 – Vazão dos drenos laterais

Para o caso de regime de escoamento permanente, a vazão é dada pelo produto da lâmina de água a ser eliminada em 24 horas e a área de influência do dreno.

$$Q = R L C \quad (52)$$

em que

Q = vazão [$\text{m}^3 \text{ dia}^{-1}$];

R = lâmina de água a ser eliminada em 24 h [m];

L = espaçamento dos drenos [m]; e,

C = comprimento dos drenos [m].

Para o regime variável, a Equação 53 fornece a vazão por unidade de área superficial do solo, q_t , derivada da equação de Glover-Dumm.

$$q_t = \frac{2 \pi k D}{L^2} h_t \quad (53)$$

Considerando a área total de influência do dreno, $L C$, e o valor de h_t igual a h_o (máximo inicial), a fórmula 53 passa a ser:

$$q_t = \frac{2 \pi k D}{L^2} h_o C \quad (54)$$

Com as unidades dos parâmetros K em m dia^{-1} , D , H_o , C e L em m , resulta Q em $\text{m}^3 \text{ dia}^{-1}$. Como nas fórmulas para o cálculo do diâmetro dos drenos, emprega-se os valores de vazão em $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$, a fórmula prática torna-se:

$$Q = 0,000073 \frac{k D}{L} h_o C \quad (55)$$

4.3.2.3.2 – Cálculo do diâmetro dos drenos laterais

Conhecida a vazão a ser eliminada pelo dreno, o passo seguinte é calcular seu diâmetro e gradiente.

a) drenos lisos (PVC liso, cerâmica)

$$d = 0,1913 Q^{0,368} I^{-0,211} \quad (56)$$

$$Q = 89 d^{2,714} I^{0,572} \quad (57)$$

em que

Q = vazão [$m^3 s^{-1}$];

d = diâmetro interno dos drenos [m]; e,

I = declividade dos drenos [adimensional].

b) drenos corrugados

$$d = 0,2557 Q^{0,357} I^{-0,187} \quad (58)$$

$$Q = 38 d^{2,667} I^{0,5} \quad (59)$$

Em áreas planas, a declividade de assentamento dos drenos é limitada pela topografia, e, por ocasião das descargas máximas, a vazão pode ocorrer em função do gradiente hidráulico em lugar da declividade.

Para evitar maiores problemas de sedimentação nos drenos, deve ser observada uma declividade mínima de assentamento de 0,10 a 0,15%. Geralmente, esta declividade é conseguida por ocasião da abertura das valas com uma profundidade mínima permissível. Isto faz com que o comprimento do dreno fique limitado a 150 - 200 m.

O uso de drenos laterais tubulares subterrâneos e de coletores principais abertos é mais recomendado. Neste caso, os drenos laterais devem desaguar cerca de 10 a 20 cm acima do fundo do coletor, para evitar o refluxo da água e materiais em suspensão para dentro deles, por ocasião das chuvas de alta intensidade.

A forma geométrica de construção dos coletores de drenagem deve ser trapezoidal. Para dimensioná-los, o procedimento mais usado é o mesmo para se dimensionar condutos livres, assunto que será detalhado em capítulo subsequente.

CAPÍTULO V: DRENAGEM SUPERFICIAL

5.1 – INTRODUÇÃO

Parte da água de chuva ou de irrigação não se infiltra no solo, escoando sobre a superfície até alcançar um canal que a elimina da zona de exploração agrícola. Quando essa eliminação não é suficiente, ocorrem encharcamentos do solo, causando uma série de problemas de excesso de umidade.

A drenagem natural das águas superficiais pode ser melhorada por meio de obras que podem se agrupar em duas classes distintas: a) sistematização do terreno e, b) construção de uma rede de drenagem. Estas obras, que se complementam, apresentam distintas características, dependendo se a área é ou não irrigada, se o terreno é plano ou acidentado.

Sendo assim, pode-se considerar dois casos de drenagem superficial, ou seja, drenagem para eliminação das águas de chuvas e drenagem em áreas com problemas de excesso de umidade.

5.2 – CONTROLE DE INUNDAÇÕES DE ÁREAS AGRÍCOLAS

Quando se fala em problemas de drenagem agrícola, evidentemente que o enfoque a ser dado diz respeito, fundamentalmente, à terrenos baixos ou várzeas.

Essas áreas, devido à sua situação topográfica, recebe todas as formas de água, quer de pequenos cursos d'água que as percorrem, escoamentos superficiais procedentes de terrenos elevados, drenagem subterrânea dessas áreas e, em casos que não são raros, recebem inundações de rios que as margeiam. A propósito, as obras de controle de inundações causadas por rios, são as que têm maior custo de implantação.

Para interceptar águas de escoamento superficial de terrenos elevados, pequenas nascentes e a drenagem desses terrenos, a solução é a construção de drenos de encosta, também chamados de drenos de contorno. Pequenos cursos d'água que

percorrem a área de baixada, têm sua calha dimensionada e seu curso retificado e, na maioria dos casos, ele pode se constituir no dreno coletor principal ou mesmo ser desviado para o drenos de encosta.

As áreas que estão localizadas próximas de rios de grandes vazões, que na época das chuvas causam inundações freqüentes, deverão se endicadas (protegidas por diques). Estas obras são de custo elevado e só devem ser concretizadas após a execução de uma análise econômica bem criteriosa. Maiores detalhes serão abordados no capítulo sobre sistemas de drenagem.

5.3 – VAZÃO A ELIMINAR

A estimativa da vazão do escoamento produzido pelas chuvas em determinada área é fundamental para o dimensionamento dos canais coletores. Existem várias equações para estimar essa vazão, sendo mais conhecida a equação racional.

A equação racional estima a vazão máxima de escoamento de uma determinada área sujeita a uma intensidade máxima de precipitação, com um determinado tempo de concentração (Equação 60).

$$Q = \frac{C i A}{360} \quad (60)$$

em que

Q = vazão máxima de escoamento [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$];

C = coeficiente de escoamento (Tabela 8);

A = área de contribuição [ha]; e,

i = intensidade máxima de chuva [mm h^{-1}] para uma duração igual ao tempo de concentração da bacia (T_c).

O tempo de concentração é o tempo transcorrido para que uma partícula de água se desloque do ponto mais remoto da bacia hidrográfica até a saída desta. Ele é função das características geográficas e topográficas da bacia. O tempo de concentração é calculado pelas equações 61 e 62.

$$T_c = 0,0256 \times K^{0,77} \quad (61)$$

$$K = \frac{L}{S} = \sqrt{\frac{L^3}{H}} \quad (62)$$

em que

- T_c = tempo de concentração [min];
- L = comprimento do curso d'água mais longo da bacia [m]; e,
- H = diferença de nível entre o ponto mais remoto e a saída [m]; e,
- S = declividade média da área de contribuição.

Tabela 8 – Valores do coeficiente C

Declividade (%)	Solo Arenoso	Solo Franco	Solo Argiloso
Florestas			
0 – 5	0,10	0,30	0,40
5 – 10	0,25	0,35	0,50
10 – 30	0,30	0,50	0,60
Pastagens			
0 – 5	0,10	0,30	0,40
5 – 10	0,15	0,35	0,55
10 – 30	0,20	0,40	0,60
Terras cultivadas			
0 – 5	0,30	0,50	0,60
5 – 10	0,40	0,60	0,70
10 – 30	0,50	0,70	0,80

5.4 – DIMENSIONAMENTO DA SEÇÃO DE DESAGUAMENTO

O dreno coletor central deverá ser projetado para receber e transportar todas as vazões que ocorrem na área do projeto, tais como: vazão procedente da drenagem subterrânea, vazão referente às perdas por escoamento superficial, caso na área exista um sistema de irrigação por superfície, vazão procedente de drenos de encosta, bem como àquela decorrente de algum pequeno curso d'água, ou dreno natural, que percorre a área.

Uma vez determinada a vazão total a ser transportada pelo coletor central, ele será dimensionado.

O dimensionamento obedece o mesmo procedimento utilizado para canais em terra com geometria trapezoidal, que é a seção utilizada para drenos abertos.

Os parâmetros necessários para se proceder o dimensionamento são os seguintes: vazão transportada (Q), talude do canal, base menor (b), coeficiente de rugosidade (n) e declividade (l).

O talude é escolhido em função do tipo de solo o qual o canal será construído mas, normalmente, utiliza-se 1:1, o que equivale à uma inclinação das paredes do canal de 45° .

Quanto à base menor do canal (b), esta deverá ter um valor atribuído, ou seja, àquela que desejamos para o dreno.

O valor do coeficiente de rugosidade é dependente da Equação que desejamos utilizar para a determinação da velocidade de escoamento da água no canal. A equação mais utilizada é a de Manning e, dessa forma, o valor normalmente utilizado para o coeficiente é 0,030.

Para que haja um escoamento adequado no coletor central, há necessidade de que ele possua declividade. Se o terreno a ser drenado for sistematizado, a declividade do dreno poderá ser a mesma utilizada na sistematização. Por decisão de projeto, elas podem ser diferentes.

A figura 23 apresenta a seção típica de um dreno coletor, com os respectivos parâmetros para dimensionamento.

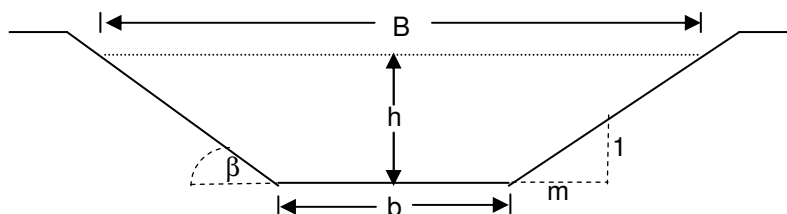


Figura 23 – Seção típica de um canal.

Para se proceder o dimensionamento do canal (coletor central), são utilizadas as equações 63, 64, 65 e 66.

a) Determinação da área de escoamento do canal

$$A = b h + m h^2 \quad (63)$$

em que

A = área ou seção de escoamento do canal [m^2];

b = base menor do canal [m];

h = carga (altura) de água no canal [m]; e,

m = cotangente do ângulo entre a parede do canal e o plano horizontal.

b) Determinação do perímetro molhado

$$P = b + 2 h \sqrt{m^2 + 1} \quad (64)$$

em que P é o perímetro molhado [m].

c) Determinação do raio hidráulico

$$R = \frac{A}{P} \quad (65)$$

em que R é o raio hidráulico [m].

d) Determinação da velocidade de escoamento utilizando a Equação de Manning

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \quad (66)$$

em que

V = velocidade de escoamento [$m s^{-1}$];

n = coeficiente de rugosidade, tabelado [adimensional]; e,

I = declividade do canal [$m m^{-1}$].

Analisando as equações 63 e 64, verifica-se que para se determinar A e P há necessidade de termos o valor da carga hidráulica (h). Para a solução do problema, o cálculo é feito por tentativas.

Como os valores de Q, b, n e I são dados de entrada para o dimensionamento, atribui-se um valor inicial qualquer para h e calcula-se A, P, R e V. Por meio da Equação de continuidade ($Q = A V$), calcula-se a vazão em função do h atribuído. Compara-se essa vazão calculada com a vazão de projeto. Se forem iguais, o h atribuído está correto. Se Q calculada for maior do que a Q de projeto, o h está excessivo; se for menor, o h está reduzido. Se o h ainda não estiver ajustado, atribui-se novo valor a ele até quando a Q calculada se igualar a Q de projeto.

Uma outra alternativa para se dimensionar um coletor é a fixação da carga hidráulica no canal (h), ajustando-se a base menor (b). O procedimento de cálculo é o mesmo já descrito para se ajustar h.

A equação de Manning nos mostra que, quanto maior a declividade, maior a velocidade de escoamento. Pela equação de continuidade verifica-se que maior velocidade implica em menor seção de desaguamento, uma vez que a vazão de projeto é constante. Em conseqüência, menor seção resulta em menor custo de escavação.

Velocidades muito pequenas favorecem a deposição de material sólido no fundo do dreno, causando assoreamento. Esse fato condiciona uma manutenção constante do dreno para que a profundidade total não decresça à ponto de bloquear a saída dos drenos subterrâneos que desaguam no coletor central. Dessa forma, a declividade mínima que o coletor deve ter é de $0,00015 \text{ m m}^{-1}$ (0,015 % ou 1,5 cm em 100 m). Já declividades muito elevadas tem como inconveniente causar erosão no dreno. Sendo assim, a declividade máxima fica condicionada aos limites máximos de velocidade de escoamento para cada tipo de solo. Estes valores estão tabelados em qualquer literatura que trata do assunto canais.

Exemplo

Um sistema de drenagem será dimensionado para escoar uma vazão de 120 L s⁻¹. Deseja-se que o escoamento se dê com uma carga de água de 0,30 m no dreno coletor. O terreno foi sistematizado com uma declividade no sentido do dreno de 0,4 %. Verificar se uma seção transversal de base igual a 0,20 m terá essa capacidade. Caso contrário, proponha soluções. O talude usado será de 1:1 e a profundidade total do dreno deverá ser de 1,3 m.

a) Determinação da área de escoamento do canal

$$A = b h + m h^2$$

$$A = 0,2 \times 0,3 + 1 \times 0,3^2 = 0,15 \text{ m}^2$$

b) Determinação do perímetro molhado

$$P = b + 2 h \sqrt{m^2 + 1}$$

$$P = 0,2 + 2 \times 0,3 \sqrt{1^2 + 1} = 1,05 \text{ m}$$

c) Determinação do raio hidráulico

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

$$R = \frac{0,15}{1,05} = 0,14 \text{ m}$$

d) Determinação da velocidade de escoamento, usando $n = 0,030$

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} i^{1/2}$$

$$V = \frac{1}{0,030} 0,14^{2/3} 0,004^{1/2} = 0,57 \text{ m s}^{-1}$$

e) Cálculo da vazão

$$Q = A \times V = 0,15 \times 0,57 = 0,0855 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} = 85,5 \text{ L s}^{-1}$$

Conclui-se assim que a seção de escoamento do canal não é suficiente para conduzir a vazão de projeto (120 L s⁻¹). Como a carga hidráulica foi fixada, existem duas alternativas: aumentar a largura de fundo (b) ou diminuir o ângulo de inclinação das paredes

do canal. A primeira alternativa é mais conveniente que a segunda, uma vez que os valores das inclinações das paredes são dependentes do tipo de solo no qual o canal será construído. Qualquer modificação nesses valores tem que atender a segurança, ou seja, o ângulo de inclinação a ser utilizado tem que ser igual ou menor que o tabelado; se for maior, pode ocorrer desbarrancamento. Vamos optar pelo ajuste na base menor do canal.

Atribuindo $b = 0,40$ m

$$A = 0,21 \text{ m}^2$$

$$P = 1,25 \text{ m}$$

$$R = 0,168 \text{ m}$$

$$V = 0,64 \text{ m s}^{-1}$$

$$Q = 0,134 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} = 134 \text{ L s}^{-1}$$

Como a vazão calculada (134 L s^{-1}) é maior que a vazão de projeto (120 L s^{-1}), a base atribuída está excessiva.

Atribuindo $b = 0,35$ m

$$A = 0,195 \text{ m}^2$$

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

$$R = 0,16 \text{ m}$$

$$V = 0,63 \text{ m s}^{-1}$$

$$Q = 0,122 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} = 122 \text{ L s}^{-1}$$

Como a vazão calculada (122 L s^{-1}) é ligeiramente maior que a vazão de projeto (120 L s^{-1}), a base atribuída já pode ser considerada ajustada.

CAPÍTULO VI: PROJETO DE UM SISTEMA DE DRENAGEM

No intuito de um melhor esclarecimento no que foi discutido nos capítulos IV e V, será desenvolvido um projeto de um sistema de drenagem. Vale ressaltar que os custos apresentados são referentes ao presente momento.

Visando a implantação de um projeto de drenagem agrícola em uma área de 42 ha (700 x 600 m), foi necessário inicialmente sistematizar o terreno ficando com uma declividade de 0,12% no sentido da maior dimensão e em nível na outra dimensão. A área será explorada com agricultura intensiva, irrigada pelo sistema de irrigação por sulcos de infiltração, onde definiu-se uma dose de rega bruta de 80 mm, estimando-se uma perda por percolação da ordem de 25%, com um turno de rega de 6 dias. Utilizando o método do poço, determinou-se a condutividade hidráulica média do solo cujo valor é $1,13 \text{ m dia}^{-1}$. Por meio de uma série histórica foi constatado que a chuva crítica esperada para o mês de maior pluviometria é da ordem de 42 mm. Por meio de sondagem, verificou-se que a camada impermeável encontrava-se a uma profundidade de 3,2 m. Em função dos dados apresentados, dimensione o sistema de drenagem para a área em questão e determine o custo aproximado para a implantação do sistema sabendo-se que serão utilizados drenos corrugados em PVC de 6", com um custo de R\$ 1,20 por metro linear. Para a abertura das valas para a instalação dos drenos laterais tubulares e para a construção do dreno coletor central, será utilizada uma retroescavadeira ao custo de R\$ 34,00 por hora. Considere um rendimento médio da máquina de 25 m^3 por hora. A O sistema deverá ser dimensionado para atender ainda as seguintes condições:

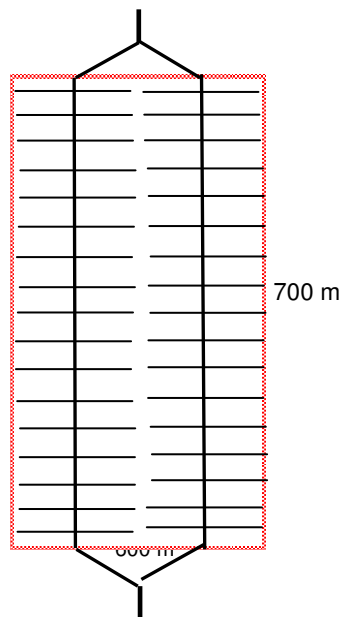
- talude do coletor central = 1:1;
- as valas para a instalação dos coletores laterais tubulares são retangulares com base de 30 cm,
- o drenos coletor central deverá transportar uma vazão de 50 L s^{-1} além da necessária à drenagem da área;
- deverá ser dada uma folga de 20 cm entre o nível de água no coletor central e a saída dos drenos subterrâneos; e,
- o comprimento máximo dos drenos laterais não deverá ser superior a 200 m.

Resolução

1 – Espaçamento entre drenos: determinação já foi feita no exemplo de aplicação do método de Glover-Dumm.

2 – Dimensionamento dos drenos

2.1 – Croqui da área do projeto



Verifica-se que por imposição do projeto, os drenos coletores não podem ter mais de 200 m de comprimento. Em virtude disto, decidiu-se projetar drenos com 150 m de comprimento com a necessidade de dois coletores centrais. Como o comprimento da área é 700 m e os drenos são espaçados de 40 m, tem-se um total de 68 drenos de 150 m cada um, sendo que cada coletor central recebe 34 drenos, ou seja, 17 em cada lado.

OBS: chegou-se a um total de 17 drenos em cada lado de cada um dos coletores dividindo-se o comprimento da área (700 m) por 40 m que é o espaçamento dos drenos, com o primeiro drenos à 10 m do início da área e o último, à 10 m do final da área.

2.2 – Vazão dos drenos laterais

Para:

- $k = 1,13 \text{ m dia}^{-1}$
- $D = 1,98 \text{ m}$ (maior valor entre época de irrigação e época de chuva)
- $h_0 = 0,40 \text{ m}$ (maior valor entre época de irrigação e época de chuva)
- $C = 150 \text{ m}$

- $L = 40 \text{ m}$

$$Q = 0,000073 \frac{k D}{L} h_0 C = 0,000073 \times \frac{1,13 \times 1,98}{40} \times 0,40 \times 150 = 0,000245 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

2.3 – Vazão dos coletores centrais

Cada coletor principal transportará a metade da vazão total escoada no sistema de drenagem, sendo a metade da vazão de drenagem respectiva ao sistema de irrigação ou chuvas (34 drenos), e a outra metade respectiva à vazão natural de 50 L s^{-1} . Dessa forma, a vazão transportada por cada coletor será:

- metade da vazão de drenagem:

$$Q_T = 0,000245 \times 34 = 0,00833 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} = 8,33 \text{ L s}^{-1}$$

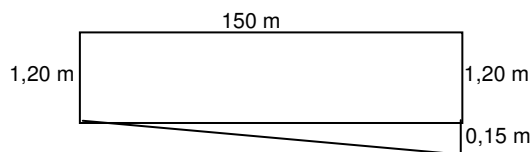
- metade da vazão natural = 25 L s^{-1}

A vazão de cada coletor = $33,33 \text{ L s}^{-1}$

2.4 – Determinação do volume de escavação do projeto

2.4.1 – Determinação do volume de escavação dos drenos subterrâneos

Os drenos subterrâneos terão 150 m de comprimento e serão instalados com uma declividade de $0,10 \%$. Nessa condição, no início de cada um deles a profundidade será de $1,20 \text{ m}$ (definida no início do dimensionamento) e no final, $1,35 \text{ m}$ (para um declive de $0,10 \%$, em 150 m a diferença de nível é igual a $0,15 \text{ m}$).



A área longitudinal de escavação será:

$$A_{\text{esc}} = (150 \times 1,2) + \left(\frac{150 \times 0,15}{2} \right) = 191,25 \text{ m}^2$$

O volume de escavação para uma largura de corte de $0,30 \text{ m}$ será:

$$V_{esc} = 191,25 \text{ m}^2 \times 0,30 \text{ m} = 57,375 \text{ m}^3$$

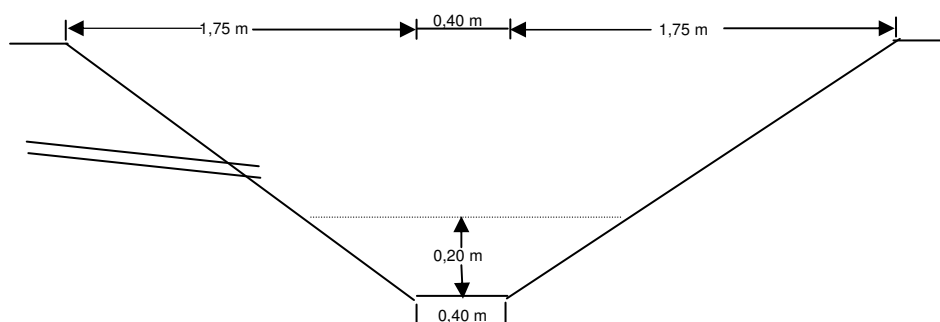
2.4.1 – Determinação do volume de escavação dos drenos coletores principais

Cada coletor principal terá seção trapezoidal e transportará uma vazão de $33,33 \text{ L s}^{-1}$. Para o dimensionamento da seção de escoamento dos canais serão utilizados os seguintes valores:

- base menor = 0,40 m;
- talude 1:1 $\Rightarrow m = 1$;
- coeficiente de rugosidade para canal em terra: $n = 0,030$;
- carga hidráulica no canal: $h = 0,20 \text{ m}$;
- declividade do canal: $I = 0,12 \%$.

Com estas dimensões, os canais transportarão uma vazão de $34,5 \text{ L s}^{-1}$ cada um, ou seja, um pouco acima do que a necessária.

A seção de escavação dos coletores centrais será:



Como a profundidade na saída dos drenos laterais é 1,35 m e como eles devem ficar 0,20 m acima do nível de água no coletor central, concluímos que a profundidade dos coletores centrais é de 1,75 m ($1,35 \text{ m} + 0,20 \text{ m} + 0,20 \text{ m}$). Dessa forma, as dimensões deles serão:

- base menor = 0,40 m;
- base maior = 3,90 m;
- profundidade total = 1,75 m.

A área transversal de escavação será determinada pela equação clássica para uma seção trapezoidal:

$$A_{\text{esc}} = \left(\frac{3,90 + 0,40}{2} \right) \times 1,75 = 3,7625 \text{ m}^2$$

Para a determinação do volume de escavação, basta multiplicar a área da seção transversal pelo comprimento total dos drenos, já que os dois coletores centrais têm as mesmas dimensões. De acordo com o croqui da área do projeto, verifica-se que há necessidade de se aumentar o comprimento dos dois coletores tanto na parte de cima quanto na de baixo da área do projeto, devido a obrigatoriedade de se instalar dois coletores centrais ao invés de apenas um. De acordo com o croqui da área do projeto, adotou-se um ângulo de partição de 60° do coletor central antes da chegada à área para os dois coletores dentro da área. Dessa forma, houve um aumento de cerca de 170 m em cada coletor tanto no início quanto no final da área. Sendo assim, cada coletor terá um comprimento total de 1040 m (700 m + 170 m + 170 m). O volume total de escavação será então:

$$V_{\text{esc}} = (3,7625 \text{ m}^2 \times 1040 \text{ m}) \times 2 = 7826 \text{ m}^3$$

2.5 – Determinação do volume total de escavação do projeto

O volume total será a soma do volume necessário à escavação para a instalação dos coletores laterais com o volume de escavação para a construção dos coletores centrais, ou seja:

$$V_{\text{total}} = 3901,5 + 7826 = 11727,50 \text{ m}^3$$

3 – Determinação do custo total do projeto

3.1 – Determinação do custo de operação da retroescavadeira

Considerando um rendimento médio da máquina na faixa de 25 m³ por horas, teremos:

$$N = \frac{11727,5 \text{ m}^3}{25 \text{ m}^3 \text{ por hora}} = 469,1 \text{ h} \cong 470 \text{ horas}$$

Com um custo R\$ 34,00 por hora, o custo total referente à operação da retroescavadeira será:

$$\text{Custo} = 470 \text{ h} \times 34,00 = \text{R\$ } 15.980,00$$

3.2 – Determinação do custo dos drenos laterais tubulares

Como serão necessários 68 drenos laterais em toda a área do projeto e como eles têm 150 m de comprimento, o comprimento total das tubulações a serem adquiridas será:

$$150 \text{ m} \times 68 \text{ drenos} = 10200 \text{ m}$$

A um custo de R\$ 1,20 por metro linear, o custo total referente às tubulações será:

$$\text{Custo} = 10200 \text{ m} \times 1,20 = \text{R\$ } 12.240,00$$

O custo de execução do projeto será então:

$$\text{Custo de execução} = \text{R\$ } 15.980,00 + \text{R\$ } 12.240,00 = \text{R\$ } 28.220,00$$

Considerando um custo adicional de 10% do custo de execução para outros custos secundários (levantamento topográfico, elaboração do projeto, acompanhamento técnico para execução, etc.), o custo final será:

$$\text{Custo total} = \text{R\$ } 28.220,00 \times 1,1 = \text{R\$ } 31.042,00$$

$$\text{Custo por hectare} = \frac{\text{R\$ } 28.985,00}{42} = \text{R\$ } 739,00$$

CAPÍTULO VII: SISTEMAS DE DRENAGEM

7.1 – CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS

A classificação geral dos sistemas de drenagem resume-se a:

- **sistemas abertos:** tanto os drenos laterais quanto os coletores, são canais abertos. As principais vantagens desse são: custo fixo menor, por não necessitar o uso de drenos tubulares; permite a visualização direta de seu desempenho; exige menor gradiente; pode exercer as funções de drenagem de superfície. Por outro lado, apresenta a desvantagem de perda de área de plantio; muitos problemas de manutenção, como desbarrancamento de taludes, assoreamento do fundo e vegetação aquática intensa; e dificulta o tráfego de máquinas e animais;
- **sistemas subterrâneos:** tanto os drenos laterais quanto os coletores, são tubulações subterrâneas; e,
- **sistemas semi-abertos ou semi-fechados:** os drenos laterais são tubulares e subterrâneos e o coletor central é um canal aberto. Em geral, é o sistema que melhor se adapta à maioria das condições ou exigências de projeto.

7.2 – ESQUEMAS DE IMPLANTAÇÃO DE UMA REDE DE DRENAGEM

Os diferentes esquemas de implantação de uma rede de drenagem são dependentes da topografia da área a ser drenada, tipo de solo e da situação do lençol freático. Em alguns casos, o problema de drenagem pode ser resolvido sem a necessidade da implantação de um projeto de grande porte. Fundamentalmente, o nível do trabalho vai depender dos objetivos a que se pretende. Em geral, os principais esquemas são os seguintes: natural, interseção, paralelo, espinha de peixe, grade, duplo principal e por agrupamento.

- **Natural:** usado quando na área existirem depressões que não poderiam ser aterradas economicamente, por meio de uma sistematização. O dreno principal deve acompanhar a maior depressão do terreno, recebendo os drenos secundários que partem das pequenas e isoladas áreas úmidas (Figura 24).

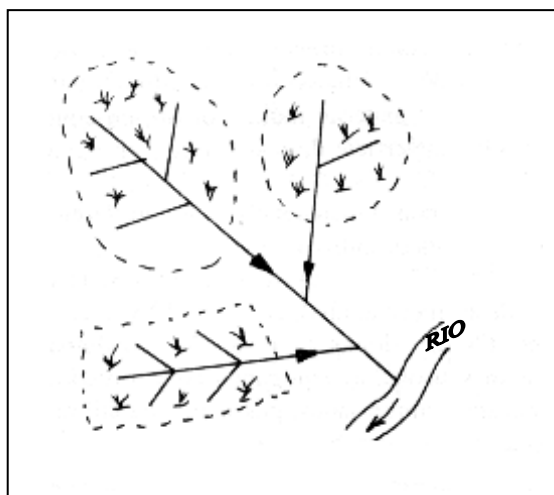


Figura 24 – Esquema natural.

- **Interseção:** usado em áreas planas e úmidas, cujo excesso de umidade tem origem em terrenos adjacentes altos. O dreno é instalado no início da elevação do terreno, interceptando a água de escoamento superficial levando-a para o ponto de desaguamento final (Figura 25).

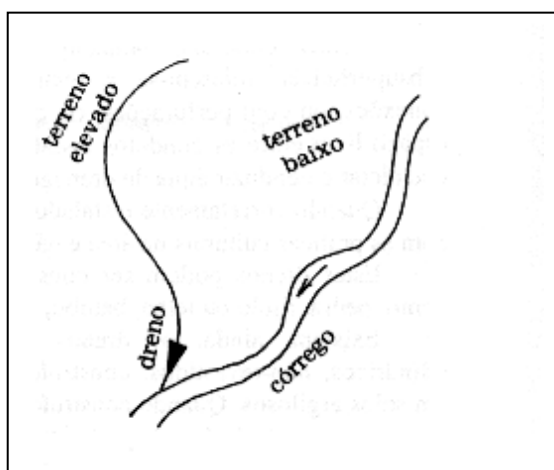


Figura 25 – Esquema interseção.

- **Paralelo:** usado em áreas planas e úmidas, cujo excesso de umidade tem origem na elevação do lençol freático. O coletor é instalado no meio da área de projeto, e os laterais ficam perpendiculares à ele, podendo ocorrer drenos laterais em apenas um lado ou dos dois lados do coletor. (Figura 26).

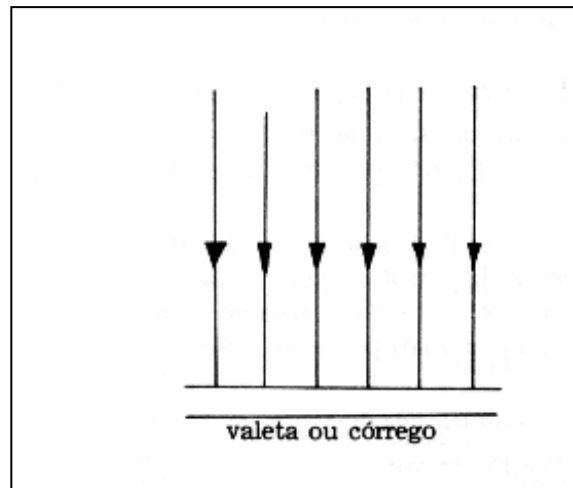


Figura 26 – Esquema paralelo.

- **Espinha de peixe:** usado quando a área a ser drenada apresenta uma depressão estreita, onde serão locados os coletores. Os drenos laterais descarregam dos dois lados do coletor (Figura 27).

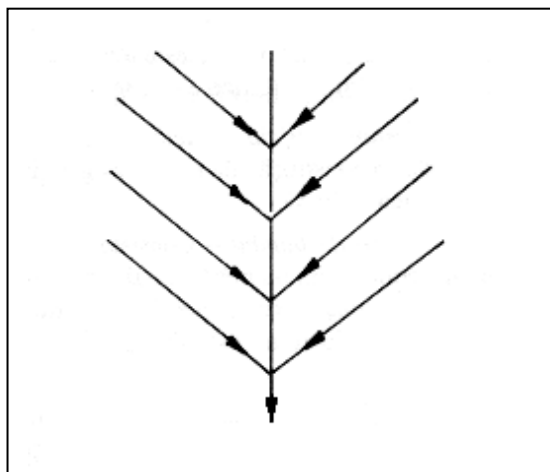


Figura 27 – Esquema espinha de peixe.

- **Grade:** utilizado em áreas planas, tendo como objetivo o efeito da dupla drenagem. Constrói-se um coletor principal e tantos coletores secundários quanto forem necessários (Figura 28).

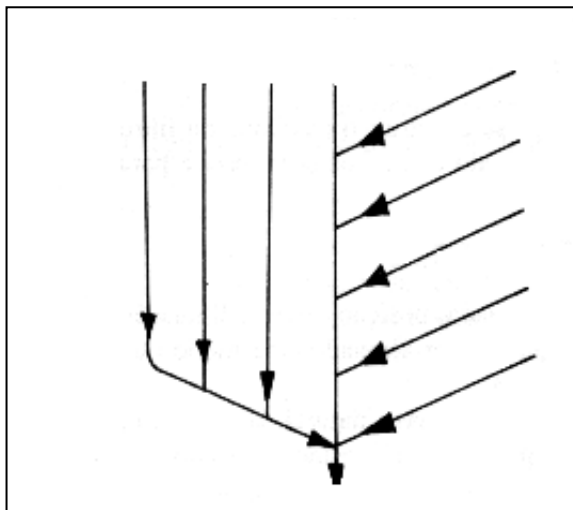


Figura 28 – Esquema grade.

- **Duplo principal:** é normalmente usado quando o terreno a ser drenado apresenta uma depressão larga. É uma modificação do sistema espinha de peixe (Figura 29).

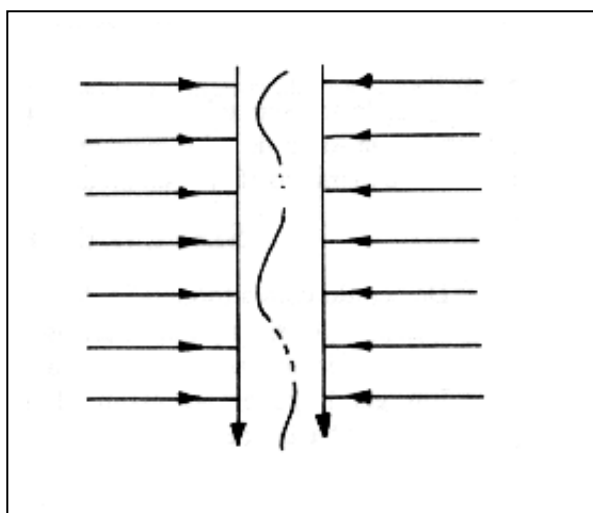


Figura 29 – Esquema duplo principal.

- **Agrupamento:** nada mais é que uma associação dos sistemas anteriores. Este é o sistema mais utilizado na prática, uma vez que, em um projeto de drenagem, dificilmente apenas um sistema específico é empregado.

7.3 – MATERIAIS UTILIZADOS EM DRENAGEM SUBTERRÂNEA

Para a implantação do sistema de drenos subterrâneos, pode-se utilizar diferentes materiais. Recentemente, quando se implanta um sistema de drenagem, é mais comum a utilização de tubos em PVC perfurado. Dentre os materiais que podem ser utilizados, destacam-se os seguintes:

- **Condutos de pedra:** são usados pedregulhos ou seixos, em camadas de 30 cm, onde a água escoará através dos espaços deixados pelo material. Deve-se ter o cuidado de colocar uma camada de capim seco ou sacos plásticos usados, sobre as pedras antes de lançar a terra na vala, para impedir a obstrução parcial dos espaços entre as pedras.
 - **Condutos de tijolos e telhas:** são usados tijolos furados e telhas curvas, dispostos em camadas alternadas, sendo normalmente duas camadas de cada material.
 - **Condutos de bambu:** este material é usado em grande escala no meio rural, em virtude de sua abundância. O dreno é aberto à profundidade desejada e, no fundo, são colocados feixes de bambu com 30 a 50 cm de diâmetro, cobertos com capim seco ou plástico. Este diâmetro equivale, em média, à um conduto livre em 4".
1. **Tubos cerâmicos:** são manilhas perfuradas, tendo diâmetro de 4". Dentro do possível, e no intuito de melhorar a eficiência de drenagem, é conveniente a colocação de uma camada de brita sob e sobre o conduto. Se ocorrer aumento significativo de custo com este procedimento, a brita poderá ser substituída por capim seco.
- **Condutos em PVC:** são os materiais mais comuns no momento. São tubos flexíveis corrugados e perfurados, em diferentes diâmetros. São vendidos em rolos de 100 a 200m de comprimento. Em serviços de maior exigência de drenagem, estes condutos

são instalados com uma base de areia e/ou brita, e cobertos com uma camada de, no mínimo, 20 cm de brita. Pode ainda ser utilizado como filtro, uma manta de material sintético denominado BIDIM. Estudos já comprovaram que o rendimento dos tubos plásticos sem base e sem revestimento, pode reduzir a eficiência de drenagem em até 50 %.

7.4 – ESTUDOS E INFORMAÇÕES NECESSÁRIAS À UM PROJETO DE DRENAGEM

O procedimento geral, obedece às seguintes fases:

1. Reconhecimento geral da área

Nesta fase, há necessidade de se percorrer a área a ser trabalhada para se ter conhecimento da natureza dos problemas, anotando as seguintes ocorrências:

- origem do excesso de água;
- determinação das áreas críticas;
- identificação dos locais de escoamento da água a ser drenada;
- localização de possíveis construções necessárias à drenagem, tais como diques de contenção, comportas; e,
- posição de pontos especiais que podem interferir no projeto.

2. Levantamento topográfico

A planta topográfica deve ser a mais completa possível, em escala conveniente, de tal sorte a trazer informações seguras para a localização e dimensionamento da rede de drenagem. Essas escalas podem variar da relação 1:1.000 até 1:50.000, dependendo do nível da drenagem pretendida. Em áreas agrícolas, à nível de drenagem local, as escalas mais comuns são 1:1.000, 1:2.000 e 1:5.000. As curvas de nível devem ser traçadas em intervalos de 0,25 m, 0,50 m, até, no máximo, 1,00 m. Além disso, há necessidade do levantamento do perfil longitudinal do local de desaguamento final, com a identificação das cotas da margem e do nível da água deste local. Normalmente, o equipamento utilizado neste trabalho é um nível topográfico.

3. Estudo de solos

Um estudo detalhado dos solos que compõem a área a ser drenada, é de fundamental importância para a execução de um projeto bem elaborado. É imprescindível a determinação da profundidade da camada impermeável, bem como as características das camadas do perfil do solo. Além desta sondagem, há necessidade da obtenção da condutividade hidráulica predominante nos solos da área e da macroporosidade.

4. Estudo da água subterrânea

O estudo completo da água subterrânea nem sempre é possível, em função do tempo disponível para a execução do projeto. Quando se dispõe de tempo suficiente, as principais determinações são as seguintes:

- determinação das variações da profundidade do lençol freático nos diferentes períodos do ano;
- localização dos pontos de alimentação e descarga do lençol freático ;
- qualidade da água subterrânea, sob o aspecto de salinidade; e,
- movimento horizontal e vertical do lençol freático.

Para a determinação da profundidade do lençol freático e suas flutuações ao longo do ano, são instalados poços de observação em toda a área. Se houver necessidade da determinação das pressões artesianas, deverão ser instalados piezômetros.

5. Informações gerais

Estas informações estão relacionadas com a(s) cultura(s) e com a climatologia local. Podemos relacionar as seguintes:

- determinação da intensidade máxima de chuva (i);
- escolha do coeficiente de escoamento superficial (C) para a estimativa da vazão máxima a ser eliminada;
- características da(s) cultura(s), tais como a taxa evapotranspirométrica e profundidade ideal do lençol freático;
- necessidade de lixiviação de sais, caso exista;
- definição prévia do comprimento dos drenos, baseado na planta plani-altimétrica da área, como também o diâmetro a ser adotado nos drenos subterrâneos; e,

- se o terreno não for sistematizado, especial cuidado deve ser tomado com as declividades dos drenos, que devem ser compatibilizada com as diferentes declividades do terreno.

BIBLIOGRAFIA

BERNARDO, S. Manual de Irrigação. Viçosa, Imprensa Universitária - UFV, 1996. 637 p.

CRUCIANI, D. E. A Drenagem na Agricultura. São Paulo, Livraria Nobel, 1980. 333 p.

MELLO, J. L. P. Drenagem Agrícola (apostila), 2004.

MILLAR, A. A. Drenagem de Terras Agrícolas: Bases Agronômicas. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1978. 276 p.

PIZARRO, F. Drenaje Agrícola y Recuperación de Suelos Salinos. Editora Agrícola Espanhola, Madrid, 1978. 525 p.