

DRENAGEM DE TERRAS AGRICOLAS

Prof. Luiz A. Lima – ENG 158/UFLA

1. Introdução

A drenagem é um processo de remoção do excesso de água dos solos de modo que lhes dê condições de aeração, estruturação e resistência. Sempre que a drenagem natural não for satisfatória, pode-se fazer, em complementação, drenagem artificial. Seu objetivo é retirar o excesso de água aplicada na irrigação ou proveniente das chuvas, isto é, controlar a elevação do lençol freático, bem como possibilitar a lixiviação dos sais trazidos nas águas de irrigação, evitando a salinização. Antes porém de proceder a drenagem de uma área, é preciso avaliar cuidadosamente seus impactos ambientais.

Os principais benefícios são:

- incorporação de novas áreas à produção agrícola (principalmente nas regiões úmidas e semi-úmidas – como brejos e pântanos) para torná-los agricultáveis;
- aumento da produtividade agrícola (melhor aeração, melhor atividade microbiana, melhor fixação de nitrogênio e fósforo, aumento da profundidade efetiva do sistema radicular);
- controle da salinidade;
- recuperação de solos salinos e/ou alcalinos;
- saneamento de áreas inundadas.

2. Efeitos do excesso de água sobre solo e plantas – Benefícios e Limitações da Drenagem

Para melhor entender os efeitos do excesso de água sobre solo e plantas, é preciso separar alguns mecanismos que participam dos processos envolvidos tais como:

Aeração: O excesso de água reduz a percentagem de ar presente no solo e com isto o oxigênio. Este mecanismo afeta muito o desenvolvimento das raízes e sobrevivência de microorganismos que necessitam de oxigênio. Vários efeitos surgem e a principal consequência é deficiência de nitrogênio (as plantas ficam amareladas)

- Redução do processo de nitrificação (a mineralização da matéria orgânica é feita por microorganismos que a decompõem em aminoácidos, amônia, amoníaco e oxidam a nitrato)
- Redução da fixação de Nitrogênio por bactérias pois a água expulsa o ar que contém nitrogênio.
- Redução do NO₃ a nitrito, óxido de nitrogênio ou nitrogênio gasoso que escapa do solo por difusão gasosa
- Parte do NO₃ também é decomposta por microorganismos que o utilizam no lugar do oxigênio atmosférico expulso pela água.

Estrutura: O excesso de água reduz a resistência do solo à compressão pois a coesão entre partículas fica reduzida. Por isso, o tráfego de máquinas afeta intensamente, compactando o solo. Essas alterações trazem alguns impactos como:

- redução da permeabilidade do solo
- redução do desenvolvimento radicular
- redução da troca de gases no solo

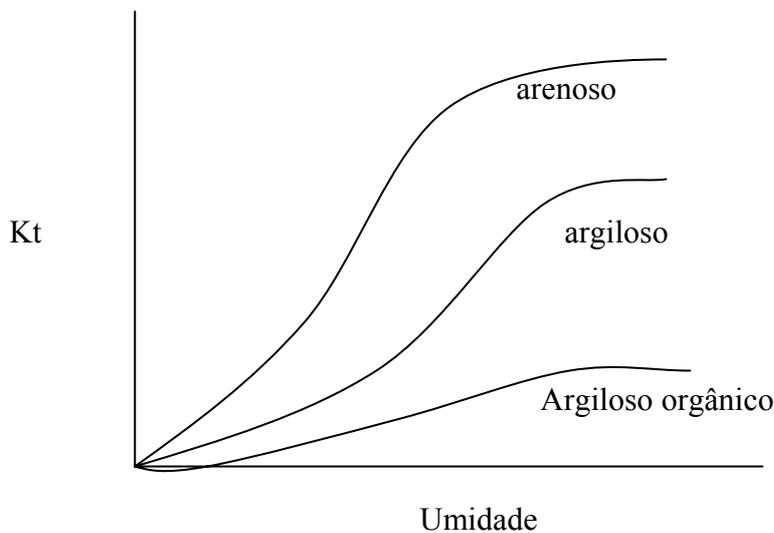
Calor no solo: A temperatura altera a condutividade térmica do solo e a capacidade calorífica do solo que pode ser escrita, conforme literatura, como:

$$C = 0.46 FM + 0.60 FO + 1.0 FA$$

Onde FM é a fração mineral, FO a fração orgânica do solo e FA a fração água do solo. Observa-se que qualquer variação na fração líquida afeta muito mais a capacidade calorífica, ou seja quantas calorias devem ser adicionadas ou retiradas para reduzir ou aumentar em um grau Celsius a temperatura do

solo. Isto explica, em parte, porque em solos mais úmidos é necessário mais calor para seu aquecimento.

Em relação à temperatura, um gráfico típico da variação da condutividade térmica versus umidade do solo é apresentado a seguir:



Como o fluxo de calor no solo é diretamente proporcional ao gradiente de temperatura e à condutividade térmica, solos mais úmidos tem maior dificuldade para condução de calor.

De modo geral, solos mal drenados demoram mais para serem aquecidos.

Doenças: O excesso de água favorece o desenvolvimento de agentes patogênicos e isto pode resultar em maior ocorrência de doenças ou mesmo pragas como mosquitos. Um exemplo típico de exceção à regra é o caso dos nematóides em que inundar o solo pode ser benéfico para redução da sua população.

Fisiologia: A deficiência de aeração pode alterar significativamente os aspectos fisiológicos das plantas. As principais consequências causadas pelo excesso de água são:

- curvatura e acamamento das plantas
- perda de geotropismo (crescimento radicular verticalmente para baixo)
- desenvolvimento acentuado de raízes adventícias
- queda das estruturas de reprodução
- surgimento de níveis tóxicos de alguns elementos do solo que sofrem redução química e provocam toxidez como ferro, cobalto, manganês, cobre, zinco e enxofre.

Salinidade: A má drenagem também pode contribuir para elevação do lençol freático que, com o acúmulo de fertilizantes aplicados ao longo do tempo, apresenta concentração de sais elevada. Este fato ocorre muito em solos rasos irrigados em excesso, e desprovidos de sistema de drenagem. A ascensão de uma frente salina pode atingir o sistema radicular das plantas e provocar toxidez generalizada, ou específica de alguns íons como sódio, boro e cloreto.

Este mecanismo dizimou a população da Mesopotâmia cerca de 2000 A.C., onde atualmente é o Iraque, entre os rios Tigris e Eufrates.

3. Porosidade drenável (μ)

Porosidade total (P) é o nome dado à porção do solo não ocupada por sólidos. Essa porção varia de 30 a 60% (0,3 a 0,6). É determinada por:

$$P = V - V_s / V$$

em que,

V = volume total

V_s = volume de sólidos

Em geral solos arenosos são menos porosos, embora seus poros sejam maiores. A porosidade total exerce influência sobre a retenção de água no solo, aeração e enraizamento das plantas.

A porosidade drenável (μ), ou água drenável, representa os poros de um solo que não conseguem reter água contra a força da gravidade. Expressa a diferença entre a porosidade total e a porosidade preenchida com água mesmo após a drenagem.

$$\mu = P - \theta_d$$

em que,

μ = porosidade drenável;

P = porosidade total;

θ_d = umidade retida pelo solo após a drenagem

Para se medir a porosidade drenável se torna necessário enviar amostra para o laboratório.

Valores típicos

Solo argiloso compacto	001-0,02
Solo bem estruturado	0,04-0,08
Areia fina	0,15-0,20
Areia grossa	0,25-0,35

Muitos consideram θ_d como equivalente a umidade de capacidade de campo. Entretanto é preciso verificar como foi determinada a capacidade de campo bem como a profundidade a ser empregada para os drenos. A capacidade de campo poderá ser utilizada desde que sua determinação tenha sido sob um valor de pressão equivalente à profundidade a ser utilizada para os drenos.

Umidade na capacidade de campo $\theta_{cc} = \theta_{0,1 \text{ atm}} = \theta_{1 \text{ mca}}$

No cerrado: $\theta_{cc} = \theta_{0,06 \text{ atm}} = \theta_{0,6 \text{ mca}}$

EUA : $\theta_{cc} = \theta_{0,33 \text{ atm}}$

Solos brasileiros: $\theta_{cc} = \theta_{0,06 \text{ atm}}$ e $\theta_{0,1 \text{ atm}}$

Solos argilosos pesados: $\theta_{cc} = \theta_{0,33 \text{ atm}} = \theta_{3,3 \text{ mca}}$

Em drenagem: $\theta_d = \theta_{0,1 \text{ atm}}$ (porque os drenos têm de 1,2 a 1,8 m)

Se $\mu = 0,05 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, significa que:

$\mu = 0,05 \text{ cm}^3 \text{H}_2\text{O} \cdot \text{cm}^{-3} \text{ solo}$, ou 5%

$\mu = 0,05 \text{ m}^3 \text{H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3} \text{ solo} = 50 \text{ L H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3} \text{ solo}$

$\mu = 0,1 \sqrt{K}$ – esta equação está presente em muitas publicações, porém não é confiável, porque não se confirma.

4. Condutividade hidráulica (K)

A condutividade hidráulica (ou constante de proporcionalidade) de um solo saturado é o principal parâmetro que determina sua capacidade de drenagem. Ela é constante para cada tipo de solo, isto é, dependerá somente da textura e da estrutura do solo.

Sua determinação tem muita importância para o dimensionamento dos sistemas de drenagem. Os métodos mais comuns para a sua determinação são: o método do permeâmetro de carga constante (método de laboratório) e o método de um poço na presença do lençol freático (método de campo).

O método do poço é um método simples, rápido e preciso, que estima a condutividade hidráulica do solo saturado, da faixa de solo entre o lençol freático e o fundo do poço.. Para executá-lo faz-se um furo com trado até abaixo do lençol. Após o equilíbrio entre a água do poço com o lençol freático, parte da água é removida. A água do solo, ao redor do poço, se movimentará para dentro do poço, elevando seu nível. A velocidade com que o nível da água subirá no poço está correlacionada com a condutividade hidráulica do solo ao redor do poço.

O objetivo das medições é determinar a velocidade com que o nível da água sobe no poço.

A determinação é dada por:

$$K = C \cdot \Delta h / \Delta t$$

Em que,

Δh = variação do nível da água durante as medições;

Δt = variação do tempo;

C = fator que depende do nível da água (h), da distância entre a profundidade do poço e a profundidade do lençol freático (H), do raio do poço r e da distância entre o fundo do poço e a camada impermeável (S)

$$C = [4000 r^2] / [(H+20r)(2-h/H)h]$$

Onde r é o raio do poço (cm), H a distancia do lençol freático até o fundo do poço, h a média entre h_0 e h_n , respectivamente a distancia do lençol ao nível inicial e final de água no poço. Deve-se considerar entretanto que $h_n > 0,75 h_0$.

Valores comuns de K	K (m.dia ⁻¹)
Solos argilosos (próximo a superfície)	0,01-0,2
Solos argilosos (camada compactada)	1×10^{-8} -0,01
Solos francos (siltosos)	0,1-1,0
Areia fina	1-5
Areia média	5-20
Areia grossa	20-100
Cascalho	100-1000
Argila + areia + cascalho	0,001-0,1

5. Salinidade e desenvolvimento de plantas

O controle de sais no perfil do solo é importante, pois os efeitos dos mesmos são indesejáveis. Tipicamente, podem alcançar níveis tóxicos para as plantas ou alterar a estrutura do solo. Podem também prejudicar economicamente o rendimento das plantas cultivadas.

Os sais originam-se durante o processo de formação do solo ou então são trazidos por movimentos de água subterrânea, água da irrigação, ou mesmo por adubação excessiva ou muito localizada (fertilização).

A salinização ocorre, geralmente, em solos situados em regiões de baixas precipitações pluviais, alto déficit hídrico e que tenham deficiências naturais de drenagem interna, sendo que, os fatores que podem contribuir para a salinização dos solos são:

- Clima – déficit hídrico climático acentuado;
- Irrigação em solos rasos ou solos de má drenabilidade;
- Irrigação com água de má qualidade – teores elevados de sais;
- Baixa eficiência de irrigação e consequentemente irrigação excessiva
- Manutenção inadequada do sistema de drenagem ou ausência de sistema de drenagem superficial e/ou subterrânea.

Como os sais podem dissociar-se em cátions e ânions, uma solução salina tem habilidade de conduzir corrente elétrica podendo os sais serem estimados a partir da corrente elétrica. Dessa forma, mede-se a condutividade elétrica (CE) da solução do solo.

$$CE = 2 \text{ mmho} / \text{cm}$$

$$\text{mho} = \frac{1}{\text{ohm}}$$

Ex.: *ohm* = unidade de resistência elétrica

$$1 \text{ mmho} = 10^{-3} \text{ mho}$$

$$cm = \frac{cm^2 \text{ de placa metálica para condução da corrente elétrica}}{cm \text{ de distância entre placas}}$$

Dados práticos indicam que o teor de sais de uma solução pode ser estimado da seguinte forma:

$$\text{Me.L}^{-1} = (10 \text{ a } 12) \times CE \text{ (mmho/cm)}$$

$$\text{Mg.L}^{-1} = \text{ppm} = 640 \times CE \text{ (mmho/cm)}$$

A comunidade científica internacional determinou como unidade padrão para CE o $ds.m^{-1}$ (deciSiemens por metro) que equivale ao *mmho/cm*.

Como a condutividade elétrica representa satisfatoriamente os sais no solo e elimina a necessidade de métodos estequiométricos, tem-se as seguintes vantagens pelo uso da CE:

- Simples e rápido;
- Barato;
- Adapta-se bem aos diferentes ambientes, pois é portátil.

A única desvantagem é que o método não revela o tipo de sais presentes na solução.

Para estimar o efeito da toxidez de sais às plantas, consideremos os resultados da tabela a seguir publicados por Ayers e Westcot (1976) – Irrigation and Drainage paper, nº 29 da FAO “Water Quality for Agriculture”.

Percentual de perda de produtividade de uma cultura em função da condutividade elétrica do extrato de saturação do solo. Fonte: FAO 39.

Cultura (vegetal/fruta)	Produtividade Potencial					
	100%		75%		50%	
	CEd	CEi	CEd	CEi	CEd	CEi
Feijão	1,0	0,7	2,3	1,5	3,6	2,4
Milho	1,7	1,1	3,8	2,5	5,9	13,9
Algodão	7,7	5,1	13,0	8,4	17,0	12,0
Arroz	3,0	2,0	5,1	3,4	7,2	4,8
Sorgo	4,0	2,7	7,2	4,8	11,0	7,2
Soja	5,0	3,3	6,2	4,2	7,5	5,0
Trigo	6,0	4,0	9,5	6,4	13,0	8,7
Repolho	1,8	1,2	4,4	2,9	7,0	4,6
Melão	2,2	1,5	5,7	3,8	9,1	6,1
Cenoura	1,0	0,7	2,8	1,9	4,6	3,1
Pepino	2,5	1,7	4,4	2,9	6,3	4,2
Alface	1,3	0,9	3,2	2,1	5,2	3,4
Cebola	1,2	0,8	2,8	1,87	4,3	2,9
Pimentão	1,5	1,0	3,3	2,2	5,1	3,4
Batata	1,7	1,1	3,8	2,5	5,9	3,9
Tomate	2,5	1,7	5,0	3,4	7,6	5,0
Figo	2,7	1,8	5,5	3,7	8,4	5,6
Uva	1,5	1,0	4,1	2,7	6,7	4,5
Citrus	1,7	1,1	3,2	2,2	4,8	3,2
Pêssego	1,7	1,1	2,9	1,9	4,1	2,7
Morango	1,0	0,7	1,8	1,2	2,5	1,7

CEd – condutividade elétrica do extrato de saturação do solo, $dS.m^{-1}$

CEi – condutividade elétrica da água de irrigação, $dS.m^{-1}$

O extrato de saturação do solo consiste na solução do solo que é extraída por vácuo a partir de uma pasta saturada. Esta pasta é resultante da mistura de terra fina seca ao ar (TFSA) e água destilada até que a mistura adquira o aspecto de pasta, sem consistência sólida. Na prática, quando colocada sobre uma espátula inclinada em 45 graus, a pasta escorrega-se com facilidade sobre a mesma.

Além do efeito generalizado dos sais sobre a produtividade das plantas, alguns elementos também apresentam toxidez específica, como exemplo podemos citar o boro e o cloro, conforme tabelas 02 e 03.

Tolerância de algumas plantas ao Boro (unidades em ppm na água de irrigação)

Tolerante (4 a 2)	Semi-tolerante (1 a 1)	Sensível (1 a 0,3)
Aspargo	Girassol	Pera
Alfafa	Batata	Maçã
Cebola	Algodão	Uva
Repolho	Tomate	Pêssego
Alface	Trigo	Citrus
cenoura	milho	Abacate

Tolerância de algumas plantas ao cloro (concentração perigosa).

Planta	mE.L⁻¹ no extrato de saturação
Citrus	15 a 25
Abacate	5 a 8
Uva Thompson Seedless)	25
Morango	5 a 8

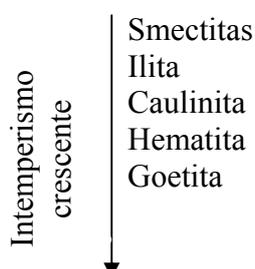
6. Salinidade e seu efeito sobre o solo

Além do efeito tóxico dos sais sobre as plantas, devemos considerar os efeitos sobre a estrutura do solo. Para isto consideremos a fase ativa do solo: a argila.

A argila no estado coloidal possui propriedades de expansão, contração, dispersão, plasticidade e coesão. Essas propriedades, de caráter físico-químico, são devidas à elevada superfície específica e à carga elétrica na estrutura das placas de argila. A expansão ocorre em argilas pouco intemperizadas e é reforçada pela presença de sódio. A superfície específica pode chegar a até 800 m².g⁻¹ de material argiloso, no caso de argilas expansivas como as smectitas, com CTC igual a 30,0meq.100g⁻¹. Já as hematitas (óxidos de ferro) e goetitas (óxidos de alumínio), bastante comuns nos solos da região de Lavras, possuem área específica entre 0,1 e 1,0 m².g⁻¹ e CTC = 3,0meq.100g⁻¹, e possuem também poder cimentante.

Os minerais do grupo caulinita possuem uma lâmina de sílica e uma de alumina, possuindo fortes ligações de hidrogênio (figura 01). Os minerais do grupo montmorilonita são constituídos de duas lâminas de sílica e uma de alumina e por isso são designados como argilas do tipo 2:1.

A expansão, característica da montmorilonita, é devida à hidratação de átomos na parte externa e principalmente na parte interna da superfície.



As partículas de argila possuem cargas elétricas, originadas da quebra de ligações e substituições dos átomos. Devido à predominância de cargas negativas na superfície das mesmas, a concentração de cátions próxima à partícula de argila é muito maior do que em pontos distantes, como na solução do solo.

Caso os átomos estejam hidratados, seus diâmetros aumentam consideravelmente, forçando a expansão da argila (distanciamento de uma placa para outra), conforme mostrado na tabela 04.

Tabela 04. Diâmetros dos átomos hidratados e não-hidratados.

Íon	Diâmetro não-hidratado(Å)	Diâmetro hidratado(Å)
Na ⁺	1,96	15,80
K ⁺	2,66	10,60
Ca ⁺⁺	2,12	19,20
Mg ⁺⁺	1,56	21,60

Diâmetro da molécula de água = 18 Å (1 Å = 10⁻¹⁰m)

Apesar do cálcio (*Ca*) e magnésio (*Mg*) apresentarem diâmetro hidratado maior que o sódio, esses cátions possuem valência dupla e são, portanto, atraídos com maior força eletrostática, impedidos portanto de promoverem o distanciamento entre placas. Já o sódio (*Na*), além de ter um tamanho hidratado considerável, é fixado com uma força bastante inferior às forças que retém cálcio e magnésio.

A força de hidratação expande a argila, enquanto a força eletrostática prende o sódio à argila. Os íons bivalentes (⁺⁺) possuem força eletrostática muito maior que a força de hidratação, enquanto que íons monovalentes (⁺) possuem força de hidratação muito que a força eletrostática.

Sendo assim, argilas com concentração acentuada de sódio expandem-se com mais facilidade, reduzindo a permeabilidade do solo e causando problemas de drenagem. No Brasil este fenômeno é mais comum nas áreas áridas e semi-áridas do nordeste.

Por outro lado, toda vez que a solução do solo (água + íons existentes nos poros) apresentar concentração muito reduzida, haverá uma tendência da solução penetrar no espaço entre placas, para promover um equilíbrio de pressão, já que a diferença de concentração cria um potencial osmótico. Esse fenômeno também é responsável pela expansão das argilas. Assim, a expansão pode ser causada também pela ausência de sais (ex: água de neve). Por isso, recomenda-se que CE ≥ 0,2 dS.⁻¹

Toda vez que a expansão for superior a 40 Å, o processo é irreversível, ou seja, há a separação definitiva das placas de argila. A esse fenômeno, dá-se o nome de dispersão química. Este é o mecanismo capaz de fragmentar a argila e conferir turbidez à água que contém argila. Resultados obtidos em análises de raio X revelam que placas de argila saturadas com cálcio não se distanciam mais que 20 Å.

Dado a importância dos íons Na, Ca, Mg, K, os pesquisadores referem-se à Percentagem de Sódio Trocável (PST), como parâmetro importante na determinação da habilidade de um solo para expansão e contração. Com isto, dependendo do tipo e teor de argila, da PST e da concentração da solução do solo, tem-se uma estimativa das reduções da condutividade hidráulica do solo, proporcionadas pelas mudanças ocasionadas na estrutura do solo, conseqüentes dos mecanismos de expansão e/ou dispersão.

$$PST = \frac{\text{sódio trocável (mE/100g de solo)}}{\text{capacidade de troca de cátions (CTC)}} \times 100 = \frac{Na}{Na + Ca + Mg + K} \times 100$$

Para relacionar estes elementos na água de drenagem ou irrigação, os técnicos consideram as respectivas valências e fazem uso da seguinte expressão:

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}}}$$

RAS = razão de adsorção de sódio, mE.L⁻¹

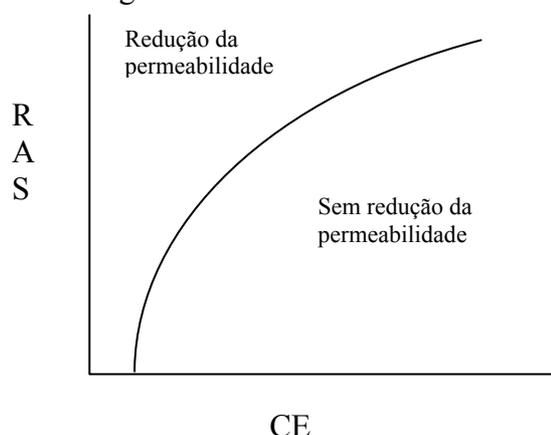
O Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos (Universidade da Califórnia – Riverside) classifica os solos quanto à salinidade em função da condutividade elétrica do extrato de saturação (CE), da percentagem de sódio trocável (PST) ou da relação de adsorção de sódio (RAS) e do pH (tabela a seguir).

Tabela 5. Classificação dos solos quanto à salinidade (EUA).

SOLO	CE (mmhos.cm ⁻¹)	RAS (%)	pH
Normal	<4	<13	<8,5
Salino	>4	<13	<8,5
Sódico	<4	>13	≥8,5
Salino/sódico	>4	>13	<8,5

Conforme podemos observar, tanto a condutividade elétrica quanto a razão de adsorção de sódio (RAS) da solução do solo são parâmetros importantes para determinar se haverá ou não danos à permeabilidade. Assim sendo, tem-se:

Em forma de gráfico:



Parâmetros que determinam os danos à permeabilidade.

Parâmetro	Efeito da permeabilidade		
	nenhum	moderado	severo
CE (ds.m ⁻¹)	>5	0,5-0,2	<0,2
RAS (montmorilonita)	<6	6-9	>9
RAS (Ilita)	<8	8-16	>16
RAS (caolinita)	<16	16-24	>24

7. Recuperação de solos sódicos e/ou salinizados

Recuperação de solos afetados por sais

Um solo se torna salino pela irrigação quando possui deficiência de drenagem interna e situa-se em região cujas condições climáticas são favoráveis a evolução do processo. Para recuperar um solo salino, deve-se instalar um sistema adequado de drenagem subterrânea e lavá-lo com a irrigação ou deixar que se recupere naturalmente pela lavagem causada pelas águas das chuvas. Ao se processar a irrigação deve ser aplicada uma lâmina de água suficiente para satisfazer as necessidades da cultura, adicionada da lâmina de lixiviação.

A lâmina de lixiviação para balanço de sais representa a fração da água de irrigação que deve atravessar a zona das raízes. Essa fração de água de irrigação a ser lixiviada vai depender do seu nível de salinidade e da tolerância das plantas cultivadas. Pode-se definir fração de lixiviação como sendo a relação entre a lâmina de água drenada (Ld) e a lâmina de água de irrigação aplicada (Li). Podendo ser

obtida também pela relação entre a condutividade elétrica da água de drenagem (CEd) e a condutividade elétrica da água de irrigação (CEi). Assim:

$$Ld.CEd = Li.CEi$$

$$FL = \frac{Ld}{Li} = \frac{CEi}{CEd} \times 100$$

Exemplo: Sendo a condutividade elétrica da água de drenagem (CEd) igual a 5,7 ds.m⁻¹ e a condutividade elétrica da água de irrigação (CEi) igual a 2,0 ds.m⁻¹, qual a lâmina de irrigação deverá percolar para manter a condutividade elétrica da água de drenagem (CEd) igual a 5,7 ds.m⁻¹?

FL = Ld / Li = 2,0 / 5,7 = 0,35 (35% da lâmina total de irrigação aplicada deverá percolar como água de drenagem).

Outra fórmula que leva em consideração outros fatores tem sido utilizada para calcular a lâmina de lixiviação. Neste caso, a água deve ser aplicada parceladamente, porém a lâmina de cada parcela deve ser suficiente para provocar o movimento dos sais, em geral no mínimo 30 a 50mm. O cálculo é feito pela equação:

$$L = 10 h FC [CE_{es} - CE_{ai}] / [CE_{des} - CE_{ai}]$$

Onde L é a lâmina de lixiviação (mm), h é a espessura da camada de solo a ser recuperado (cm), CE_{es} a condutividade elétrica do extrato de saturação (dS/m), CE_{ai} a condutividade elétrica da água de irrigação (dS/m), CE_{des} a condutividade elétrica desejada para o extrato de saturação, e FC o fator de correção igual a 0,1. Caso a lâmina de lixiviação seja aplicada em um único evento (de uma só vez), o valor de FC deverá ser 0,4. A diferença imposta pela maneira de aplicar a lâmina de lixiviação, parcelada ou de uma só vez, provém do fato de que aplicações parceladas, com 24 horas entre aplicações, permite que os sais presentes nos microporos possam migrar por difusão química (diferença de concentração) e serem lavados mais facilmente na próxima parcela de aplicação.

Recuperação de solo sódico

Um solo é considerado sódico quando possui PST > 7. Para recuperar um solo sódico deve-se aplicar produtos com cálcio ou magnésio, sendo o gesso o mais utilizado, por apresentar maior percolação no solo e maior solubilidade. Os corretivos de aplicação no solo são mostrados na tabela a seguir:

Corretivos para recuperação de solos sódicos.

Produtos	Fórmula	Peso.equivalente	Solo calcáreo	SLC (pH>7,5)	SLC (pH<7,5)	FC
Gesso	CaSO ₄	86	A	A	A	1,25
Cloreto de cálcio	CaCl ₂ .2H ₂ O	73,4	A	A	A	1,25
Enxofre*	S	16	A	A	AR**	1,25
Ácido sulfúrico	H ₂ SO ₄	49	A	A	AR	1,10
Calcáreo***	CaCO ₃	50	I	Pu	A	1,10

SLC solo livre carbonato; FC – fator de correção; A – adequado; AR – adequado com restrições; PU – pouco útil; I – inadequado

* recomendado para solos sódicos que apresentem cálcio no corpo do solo

** o solo já possui enxofre e sua adição irá acidificar ainda mais

*** pouco solúvel

Peso equivalente = peso molecular / valência (CaCO₃)

Peso molecular do CaCO₃ = 1 X 40 + 1 X 12 + 3 X 16 = 40 + 12 + 48 = 100

Peso equivalente = 100 / 2 = 50

Dosagem do produto para recuperar um solo sódico

$$D(\text{kg.ha}^{-1}) = \frac{\Delta\text{PST} \cdot h \cdot \text{CTC} \cdot \text{PEQ} \cdot \rho \cdot \text{Fc}}{100}$$

Em que,

h = espessura de solo a ser recuperado, cm

CTC – capacidade de troca de cátions, miliequivalentes. 100g^{-1}

PEQ = peso equivalente (para calcular dosagem)

ρ = densidade do solo, g.cm^{-3}

FC = fator de correção que depende do produto a ser usado

ΔPST = redução desejada para PST

Ex.: PST = 20 $\xrightarrow{\text{recuperar}}$ 5 (<7)

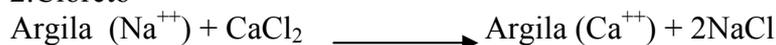
ΔPST = 15

REAÇÕES

1. Gesso



2. Cloreto

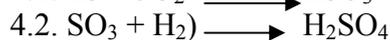
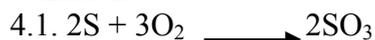


3. Ácido sulfúrico



A reação acima justifica-se pois a solubilidade do carbonato de cálcio já presente no solo (0,013 g/l) é muito inferior à solubilidade do gesso (2 g/l). O ácido sulfúrico aplicado em solos livres de carbonatos solubiliza outros compostos como os sulfatos.

4. Enxofre



5. calcáreo



Resumindo:

PST > 7 – solo sódico (aplicar gesso)

PST > 4 – solo salino (fazer lixiviação); as forrageiras também são hábeis em desalinizar.

O gesso deve ser aplicado com grade incorporadora.

A água de irrigação não pode ter CE alta para não tornar o solo salino; nem deve ter muito sódio para não tornar o solo sódico. Por isso, a RAS da água não pode ser alta (ideal RAS < 4); RAS > 9 torna-se preocupante.

Se o solo for salino/sódico aplicar gesso para depois fazer a lixiviação, pois, se lavar antes, a água não vai penetrar no solo. Após a lixiviação proceder a uma análise do solo porque os nutrientes estarão comprometidos. Para recuperar solos salinizados os drenos deverão ser mais profundos (1,8 m).

8. Drenagem de escoamento superficial

Define-se escoamento superficial a parte da precipitação total, em uma área, que escoar sobre a superfície do terreno.

Para dimensionar um dreno coletor de escoamento superficial precisa-se estimar a vazão deste escoamento. É necessário também considerar a intensidade da chuva, em mm.h^{-1} , denominada chuva de projeto.

Os métodos geralmente empregados para estimar o escoamento superficial são:

1. Método Racional
2. Método de McMath
3. Regionalização de vazão

Para a chuva de projeto, deve-se considerar dois fatores:

1. Recorrência da chuva, ou tempo de retorno - TR. Define o prazo em anos necessário para que ocorra uma chuva tão intensa utilizada para dimensionar o projeto (chuvas muito intensas não ocorrem facilmente). Para projetos de drenagem urbana considera-se um tempo de retorno - TR, de 30 a 50 anos e para projetos de drenagem agrícola considera-se TR igual a 5 anos.

2. Duração da chuva, ou tempo de concentração - TC. Geralmente, quanto maior a duração da chuva, menor sua intensidade. Para projetos de drenagem, a duração da chuva será a menor possível porém com duração suficiente para chover enquanto a enxurrada percorre toda a encosta ou bacia (essa será a pior situação em termos de vazão de enxurrada). Assim, a duração é equivalente ao tempo de concentração que pode ser calculado pela equação de Kirpich (1962):

$$TC = \frac{L^{1.15}}{3080.H^{0.38}}$$

em que:

TC = tempo de concentração, hs;

H = diferença de altura entre o ponto mais distante e o ponto de saída da bacia (desnível), m;

L = comprimento do desnível, m.

Para quantificar estas duas dimensões (TR e duração) deve-se considerar os limites da bacia, ou seja, deve-se considerar os cursos que contribuem para o curso principal.

O tempo de concentração é o tempo de deslocamento de uma partícula de água do ponto mais distante de uma bacia até o ponto de saída desta. Neste momento, toda bacia estará contribuindo simultaneamente na formação da descarga máxima de escoamento.

Em Minas Gerais, a Copasa desenvolveu equações para descrever a intensidade da chuva de muitos municípios. Para Lavras, a equação publicada pela Copasa é:

$$I(\text{mm.h}^{-1}) = \frac{10225.TR^{0.187}}{(TC + 56.3)^{1.149}}$$

em que,

TR = tempo de retorno (recorrência), anos;

TC = tempo de concentração (duração), min;

Método Racional

Este método é de uso simples e prático, porém fornece resultados altos para bacias maiores que 50 ha. Isso se deve ao fato de que a fórmula admite em seus princípios que a chuva é uniformemente em toda a área da bacia, o que geralmente só acontece quando a chuva é do tipo convectiva, isto é, bastante localizada, de alta intensidade e baixa duração.

Após determinação da intensidade da chuva pode-se calcular a vazão pela equação:

$$Q(\text{m}^3.\text{s}^{-1}) = \frac{CIA}{360}$$

Em que,

C = coeficiente de escoamento superficial, isto é, proporção da chuva que se transforma em escoamento superficial. Varia de 0 a 1 e é adimensional;

I = intensidade da chuva, mm.h⁻¹;

A = área da bacia, ha

O coeficiente de escoamento depende de vários fatores como solo, cobertura vegetal, grau de saturação do solo e declividade geral da bacia. É comumente obtido em função de fatores como textura predominante da área, declividade geral da bacia e tipo de cobertura vegetal, utilizando-se tabelas existentes como a tabela abaixo.

Valores do coeficiente de escoamento superficial (c).

Cobertura vegetal	Declividade (%)	Permeabilidade		
		Alta*	Média**	Baixa***
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
Pastagem	0 -5	0,10	0,30	0,40
	5 -10	0,15	0,35	0,55
	10 -30	0,20	0,40	0,60
Floresta	0 -5	0,10	0,30	0,40
	5 -10	0,25	0,35	0,50
	10 - 30	0,30	0,50	0,60

* solos arenosos; ** solos francos; *** solos argilosos

Exemplo1

Calcular a vazão do escoamento superficial para a bacia com área de 4.000 ha com talvegue de 3000m, desnível de 50m, com coeficiente de escoamento superficial igual a 0,30. Considerar recorrência de 30 anos.

Resolução:

1. Calcular o tempo de concentração:

$$TC = \frac{L^{1.15}}{3080.H^{0.38}} = \frac{3000^{1.15}}{3080.(50)^{0.38}} = 0,73 h \text{ ou } 44 \text{ min}$$

2. Calcular a intensidade de chuva (usar equação da Copasa para a cidade de Lavras)

$$I(mm.h^{-1}) = \frac{10225.TR^{0.187}}{(Tc + 56.3)^{1.149}} = \frac{10225.(30)^{0.187}}{(44 + 56.3)^{1.149}} = 96,9 \text{ mm.h}^{-1}$$

3. Calcular o escoamento superficial.

$$Q = \frac{CIA}{360} = \frac{0,30 \times 96,9 \times 4000}{360} = 323 \text{ m}^3 .s^{-1} \quad (\text{superstima a vazão do escoamento superficial})$$

Método de McMath

Este método é válido para bacias maiores que 200 ha. A fórmula foi obtida em função da fórmula racional, possui um fator de redução de área que evita um aumento linear e irreal das vazões em função das áreas de contribuição. É o método comumente usado pela Codevasf, Ruralminas e outros órgãos que trabalham com recursos hídricos, para dimensionamento do escoamento superficial. É representado pela equação:

$$Q = 0,0091.C_{mm}.I.A^{4/5}.S^{1/5}$$

Em que,

C_{mm} = coeficiente de McMath

I = intensidade da chuva de projeto, mm.h^{-1} ;

A = área da bacia, ha;

S = declividade da bacia, m.m^{-1}

O coeficiente de McMath é obtido pela soma dos três coeficientes selecionados para caracterizar a bacia

Valores do coeficiente de McMath (C_{mm}).

Cobertura vegetal	Tipo de solo	Tipo de relevo
Gramíneas 0,08	Arenoso 0,12	Plano 0,04
Razoável 0,16	Médio 0,16	Ondulado 0,08
Esparsa 0,30	Pesado 0,30	Escarpado 0,15

C_{mm} = soma dos valores das 3 colunas

Exemplo 2

Recalcular o escoamento superficial do exemplo anterior, considerando o valor do C_{mm} de 0,30.

Resolução:

Sendo:

$A = 4.000$ ha

$L = 3.000$ m

$H = 50$ m

$C_{mm} = 0,30$

$I = 96,6$ mm.h^{-1}

$S = \text{declividade} = (50\text{m}/3000\text{m}) = 0,016\text{m.m}^{-1} = 16\text{m.km}^{-1}$

$$Q = 0,0091 \cdot C_{mm} \cdot I \cdot A^{4/5} \cdot S^{1/5}$$

$$Q = 0,0091 \times 0,30 \times 96,9 \times 4000^{0,8} \times 0,016^{0,2}$$

$$Q = 88\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Método da Regionalização

Neste método mede-se a vazão do córrego e a chuva ao longo de um período representativo, geralmente durante um ano. A seção transversal deve ser determinada para diferentes profundidades de água no córrego e, com um molinete hidráulico faz-se a medição da velocidade. Instalar uma régua graduada na seção transversal para verificação do nível da água (profundidade). Depois deve-se estabelecer uma correlação entre a velocidade e a vazão e ao mesmo tempo, deve-se analisar a vazão do córrego versus a chuva.

Os dados são trabalhados conforme a posição geográfica na região e interpolações são realizadas para que seja possível determinar vazão de acordo com o local.

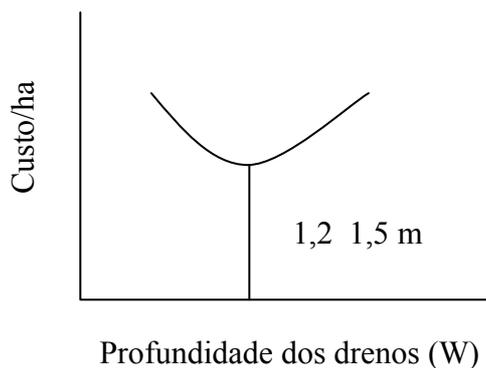
9. Espaçamento de drenos

O cálculo de espaçamento de drenos pode ser feito com emprego de diferentes métodos. Entretanto, algumas equações aplicam-se melhor para um determinado regime de chuva do que outras. Para tanto, os procedimentos são divididos em métodos para regime constante ou regime variável. Regime constante é aquele em que a posição do lençol freático permanece inalterada durante a chuva, ou seja: a quantidade de chuva que entra menos a água consumida pelas plantas e evaporada é a mesma que sai pelos drenos, de modo que o lençol freático não se eleva e nem é rebaixado. Este regime aplica-se apenas em regiões onde as chuvas são de baixa intensidade e longa duração, bastante comum na região central dos Estados Unidos e nos países baixos da Europa (Holanda, Bélgica...). O Regime Variável é aquele em que as chuvas são de alta intensidade e curta duração. Neste regime os drenos não conseguem remover a água da chuva enquanto ela ocorre. A chuva intensa eleva o lençol freático e a drenagem ocorre após a chuva, tendo que rebaixar o lençol num determinado período de tempo. Este regime é bastante comum em clima úmido e sub-úmido como no Brasil.

Para calcular o espaçamento entre drenos duas equações são consideradas, em função do regime de drenagem:

- Regime permanente – se aplica a equação de Hooghoudt.
- Regime variável – se aplica a equação de Glover Dumm.

Outro fator a ser considerado no cálculo de espaçamento de drenos é a profundidade dos mesmos, que pode ser aumentada para trazer benefícios (maior espaçamento entre drenos; menos tubos por hectare). Porém, a escavação em níveis mais profundos pode acarretar em maiores custos de construção. De uma maneira geral, a profundidade ideal dos drenos situa-se entre 1,2 e 1,5 metros, pois fora desta faixa tem-se muitos drenos por hectare ou altos custos de escavação.



A profundidade dos drenos depende também de outros fatores tais como:

- a profundidade não deve exceder a profundidade do ponto de descarga disponível;
- drenos muito profundos podem proporcionar a entrada de água subterrânea, proveniente de áreas vizinhas;
- os drenos não devem ser instalados em camadas impermeáveis, nem em areias instáveis;
- drenos muito profundos podem drenar excessivamente o solo, expondo a cultura a riscos de seca;
- as máquinas disponíveis devem ser consideradas. O rendimento econômico dessas máquinas ainda é bom se os drenos são enterrados a uma profundidade de 1,2 a 1,5 m. As retroescavadeiras rendem cerca de 25 m³/h enquanto as escavadeiras hidráulicas rendem até 80 m³/h.

Na região úmida da Europa os drenos são instalados em profundidades de 0,9 a 1,2m; em regiões áridas e semi-áridas, quando a drenagem visa controlar os sais no perfil, esta profundidade pode e deve ser maior (1,8m ou mais).

Regime constante

O critério básico neste caso especifica a recarga (q) que o sistema deve drenar permanentemente para manter o lençol numa altura mínima (h) constante (o lençol permanece na mesma posição). Também conhecido como regime permanente, caracteriza-se por chuvas de longa duração e de baixa densidade em que o lençol freático permanece em uma posição constante e a drenagem ocorre junto com a chuva, ou seja, a quantidade de chuva que entra no perfil é a mesma evapotranspirada ou retirada pela drenagem.

O critério de drenagem a ser empregado depende dos objetivos a serem cumpridos pelo sistema de drenagem. Neste caso, o critério de drenagem é drenar uma determinada lâmina diariamente. Por exemplo, nos Estados Unidos tem sido comum a drenagem de 6 a 8mm/dia.

Para calcular o espaçamento entre drenos neste regime emprega-se então a equação de Hoogoudt que pode ser escrita como:

$$L^2 = \frac{4Kh}{q}(2D + h)$$

Onde L é o espaçamento a ser adotado entre drenos (m), K a condutividade hidráulica do solo (m/dia), h a altura máxima do lençol freático acima dos drenos (m), e q é a recarga de água a ser drenada (m/dia).

Em drenagem, é bastante possível a ocorrência de fluxo predominantemente radial (figura abaixo), situação que pode ser prevista sempre que a distância dos drenos até a camada impermeável (D) for maior que W (profundidade dos drenos). Quando esta situação ocorre, o valor de D precisa ser corrigido, isto é, substituído por d . Neste caso, o valor de d pode ser calculado como:

$$d = \frac{\pi L}{8LN(L/u)}$$

Onde u é o perímetro molhado do dreno. Para drenos abertos seria a largura do fundo do dreno mais duas vezes a altura da lâmina de água correndo no dreno (em geral 5cm). Neste caso, por exemplo para um dreno com 30 cm de largura de fundo $u = 40$ cm ou 0,4 m. Para drenos tubulares, a água corre em geral com meia seção preenchida. Neste caso, u é o perímetro da seção transversal dividido por 2.

Regime Variável

A equação utilizada para cálculo de espaçamento de drenos em regime variável e a Equação de Glover-Dumm, que pode ser escrita como:

$$ht = 1.16.ho.e^{-\alpha t}$$

$$\alpha = \frac{\pi^2 . K . D}{\mu . L^2}$$

em que:

K = condutividade hidráulica (m/dia)

α = fator de reação (dia^{-1})

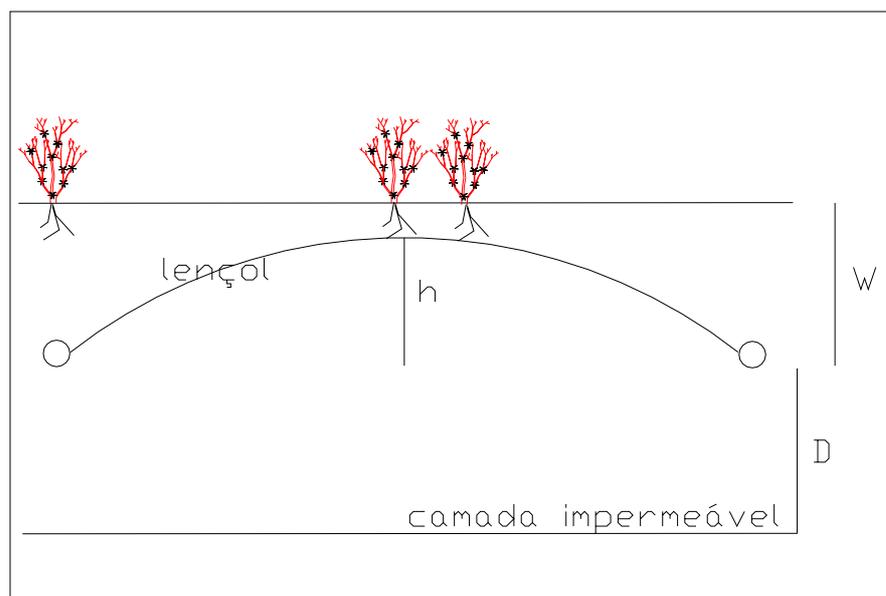
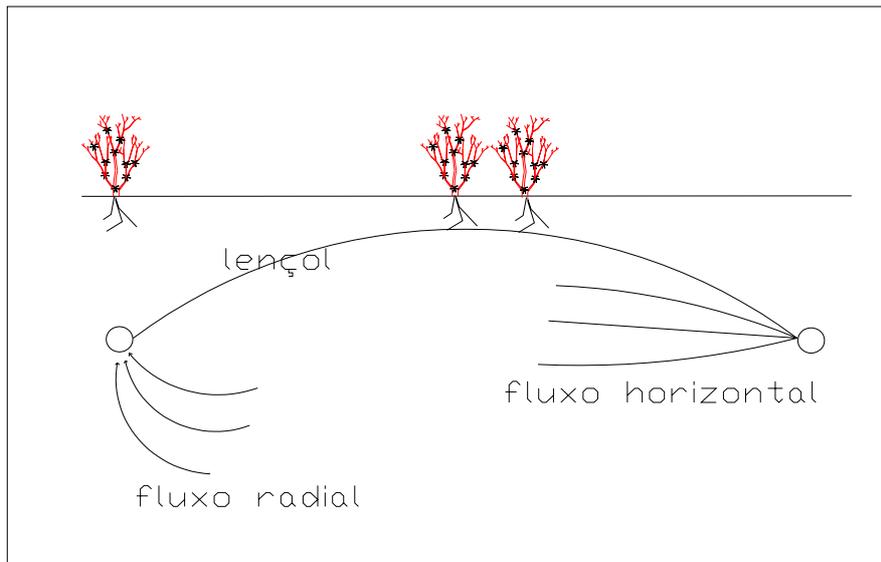
μ = porosidade drenável (cm^3/cm^3)

t = tempo permitido para o rebaixamento do LF (dias);

D = distância do fundo do dreno à camada impermeável (m);

L = espaçamento entre drenos (m)

R = rebaixamento do LF (m)



OBS.: o critério de drenagem define o rebaixamento do lençol freático e o prazo (tempo). Ex.;

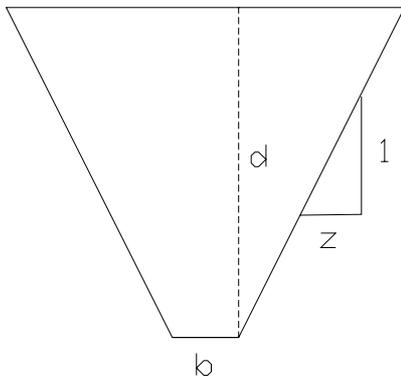
Feijão	rebaixamento = 30 cm
	Prazo = 3 dias

Citrus	rebaixamento = 50 cm
	Prazo = 5 dias

Caso haja fluxo radial ($D > W$), o valor de D na equação acima também precisa ser substituído por d , conforme recomendado para regime permanente.

10. Drenos e Materiais Drenantes

A drenagem subterrânea emprega basicamente dois tipos de drenos, abertos e fechados (tubulares). Os drenos abertos são valetas com seção transversal no formato trapezoidal, de paredes inclinadas, com objetivo de evitar o desmoronamento, conforme ilustrado na figura abaixo.



A largura do fundo do dreno (b) é em geral de 30 cm, e a inclinação do talude (z) varia de 0,5 a 1,0 desde solos bastante coesos até solos soltos (arenosos). A profundidade (d) varia de 1,2 a 1,5 metros. Como os drenos tem esta profundidade, facilmente transportam a vazão de escoamento subterrâneo proveniente do solo.

Esta mesma seção transversal pode também ser empregada em drenos de encosta que são aqueles drenos construídos ao longo da divisa entre a área plana a ser drenada e a encosta que pode trazer escoamento superficial e subterrâneo capaz de inundar a área a ser drenada. Esses drenos também são conhecidos como drenos interceptores ou drenos de cintura. Neste caso, como a vazão do escoamento superficial pode ser grande, os drenos podem ter seção transversal maior, com largura de fundo maior e até mesmo a profundidade. Para o dimensionamento de drenos abertos, adota-se o mesmo procedimento para cálculo de canais, ou seja, emprega-se a Equação de Manning que pode ser escrita como:

$$Q = \frac{A R^{2/3} \cdot S^{1/2}}{N} \quad R = \frac{A_m}{P_m}$$

Onde Q é a vazão a ser transportada (m^3/s), A é a área da seção transversal do dreno (m^2), R é o raio hidráulico do dreno (m), P_m é o perímetro molhado do dreno (m), S é a declividade longitudinal (m/m) e N é o coeficiente de rugosidade de Manning, que pode variar desde 0,050 para valetas mantidas limpas de vegetação e bem acabadas, até 0,200 para valetas sujas, com vegetação.

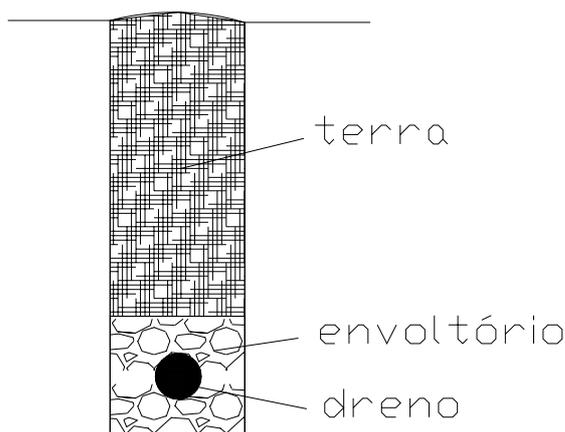
A área molhada pode ser calculada como:

$$A = bd + zd^2 \\ P = b + 2d(1+z^2)^{1/2}$$

Onde b é a largura do fundo do dreno (m), d é a profundidade da água correndo no dreno (m), e z é a inclinação do talude (para cada metro na vertical z metros na horizontal).

Após dimensionado o dreno, é preciso calcular a velocidade $V = Q/A$. É importante ressaltar que velocidades inferiores a 0,3 m/s proporcionam a sedimentação de materiais sólidos e com isto o assoreamento dos drenos. Já as velocidades superiores a 0,9 m/s podem causar erosão nos drenos.

Quando os drenos são enterrados, abre-se uma valeta com largura equivalente a três vezes o diâmetro do tubo, com inclinação de talude zero (retangular) ou com pequeno talude ($z = 0,2$). Depois de colocar no fundo da valeta uma camada de material envoltório (veja texto a seguir) de espessura equivalente ao diâmetro do tubo, coloca-se o dreno no centro e o cobre com mais material envoltório para depositar sobre o tubo uma camada de espessura equivalente ao diâmetro do tubo utilizado. Sobre a camada de envoltório coloca-se uma manta plástica e depois repõe-se a terra até cobrir toda a valeta (figura a seguir).



Como o fluxo é tipicamente variado, a vazão do dreno pode ser calculada da seguinte forma:

$$Q = 89.d^{2.71} .S^{0.57} \quad \text{para tubos lisos (equação de Darcy-Weisbach)}$$

$$Q = 38.d^{2.67} .S^{0.50} \quad \text{para tubos corrugados (equação de Chezi-Manning)}$$

em que,

$$Q = \text{vazão, m}^3 \cdot \text{s}^{-1};$$

$$D = \text{diâmetro do tubo, m};$$

$$S = \text{declividade longitudinal, m} \cdot \text{m}^{-1}$$

Construção das valetas: As valetas podem ser escavadas com auxílio de retroescavadeira (escavadeiras acopladas ao trator de pneu) ou escavadeiras hidráulicas (escavadeiras de esteiras). Enquanto uma retroescavadeira cava aproximadamente 25 m³/hora, a escavadeira hidráulica pode cavar até 100 m³/hora. Caso a escavação seja manual (pequenos drenos), o rendimento é da ordem de 0,5 m³/hora. A terra retirada durante a escavação, caso não seja retornada para valeta (drenos fechados ou tubulares), deverá ser esparramada ao lado dos drenos pois do contrário poderá cair dentro do próprio dreno durante chuvas e outras operações normais da agricultura.

Material Envoltório: Os drenos tubulares requerem a instalação ao seu redor de material envoltório. Esses materiais também são designados em alguns livros como filtros. O material envoltório tem a finalidade de colocar ao redor do dreno, onde o movimento de água no solo pode ser tão rápido que se torna erosivo, material permeável mas de grande resistência à erosão. Outra finalidade é diminuir a perda de carga da água ao entrar no tubo. Esta perda de carga já foi estudada e é inversamente proporcional a condutividade hidráulica do material envoltório. Por isso, os materiais empregados devem ser materiais altamente permeáveis (condutividade hidráulica no mínimo 10 vezes a condutividade hidráulica do solo) e de grande resistência à erosão. Neste caso, são bons materiais os pedriscos, brita, cascalhos, areia grossa, fibra vegetal, fibra sintética, etc.

O tamanho das partículas do material envoltório deve ser tal que 100% das partículas tenham tamanho inferior a 38mm e 90% sejam menores que 20mm. É desejável também que 85% das partículas tenham tamanho superior a metade da largura do orifício do tubo de drenagem (sabe-se que as partículas se prendem umas às outras e que sendo maiores que metade da largura do orifício já é suficiente para que não passem pelo orifício durante a drenagem). Segundo pesquisadores holandeses, a espessura mínima do material envoltório ao redor do tubo deve ser de 1 centímetro. O Departamento de Drenagem (USBR) dos Estados Unidos sugere 10cm. Na prática a recomendação atual é de que seja equivalente ao diâmetro do tubo.

O emprego de fibra sintética é bastante questionável pois seu custo inviabiliza a aplicação de material envoltório com a espessura recomendada acima.

11. Isoípsas e linhas de fluxos

Para dimensionar um sistema de drenagem, é preciso levantar as cotas do terreno em muitos pontos, preferencialmente numa malha regular. Nesses pontos é preciso furar um buraco com trado para identificar o nível da água 24 horas depois. A profundidade da água em cada furo deverá ser descontada da cota do terreno para descobrir a cota do lençol freático naquela data. As cotas do lençol freático serão usadas para desenhar um mapa com curvas de nível que passa por pontos onde o lençol freático tem a mesma cota. Essas curvas são designadas como isoípsas.

Uma vez desenhadas as isoípsas, linhas que cortam perpendicularmente as isoípsas deverão ser desenhadas para identificar o caminho naturalmente percorrido pelo movimento subterrâneo da água. Essas linhas são conhecidas como linhas de fluxo.

O mapa abaixo ilustra as isoípsas e linhas de fluxo. As linhas de fluxo são representadas pelas linhas de maior espessura. Os números identificam a cota (metros) de cada curva do lençol freático (isoípsas). O conhecimento do mapa de linhas de fluxo é de grande importância pois determina a direção em que deverão ser instalados os drenos. Neste caso, para o mapa a seguir, os drenos deverão ser instalados na direção horizontal pois assim cortarão as linhas de fluxo. O motivo para tal é que uma vez instalados os drenos, o movimento subterrâneo da água será numa direção similar a que já estava ocorrendo antes da instalação dos drenos..



12. Impactos Ambientais / Projeto de drenagem

Os impactos ambientais da drenagem são muitos pois uma grande intervenção é realizada de modo a alterar o regime hídrico da região abrangida. Entretanto, alguns impactos podem ser classificados como de maior relevância e podem ser agrupados como:

a) Alteração no regime hídrico da descarga da água subterrânea

A drenagem facilita a saída de água que se encontra em excesso no solo. Este processo ocorre principalmente na época das chuvas e tende a aumentar a vazão dos córregos que recolhem água da área drenada durante este período. Em contrapartida, na época seca, o solo drenado não dispõe mais de excesso de água para fornecer ao córrego adjacente, de modo que a drenagem tende a aumentar a vazão dos córregos na época das chuvas e diminuí-la na época das secas, época em que mais é necessária a vazão nos córregos, em virtude da escassez. É importante lembrar que o volume total de água liberada anualmente por uma área drenada tende, pelo menos no princípio, a permanecer inalterado quando comparamos o volume antes e após a drenagem. A alteração que ocorre é o aumento do volume drenado na época chuvosa e a redução na época seca.

b) Subsidência

A subsidência é o rebaixamento que ocorre no solo, tornando as camadas drenadas menos espessas. O fenômeno ocorre gradualmente e pode levar décadas até se estabilizar após a drenagem de um solo. Áreas drenadas na Flórida e na Holanda chegaram a exibir redução na espessura do solo superior a um metro, ao longo do tempo. A subsidência ocorre por dois fenômenos:

O primeiro deve-se à remoção da força flutuante pela drenagem que existia quando o solo estava saturado. O peso de uma camada de solo antes da drenagem, quando se encontra em meio saturado, corresponde ao próprio peso do solo decrescido do peso da massa de água que o solo teria deslocado pela sua presença no perfil. Este fenômeno é conhecido como Princípio de Arquimedes e também pode ser entendido como todo corpo submerso tem seu peso reduzido em quantidade equivalente ao peso da água deslocada pela presença do corpo. Por exemplo, 1,2 toneladas de solo que ocupavam 0,5 metro cúbico, quando submersa em água pesa na verdade 0,7 toneladas porque deslocou 0,5 metro cúbico de água que pesa aproximadamente 500 Kg.

O segundo fenômeno é que a drenagem de solos com elevado teor de matéria orgânica sob condições de saturação, expõe a matéria orgânica aos processos de oxidação que transforma parte da matéria orgânica em CO₂ e água, reduzindo seu volume. Este fenômeno explica a subsidência comum quando áreas turfosas são drenadas (turfa: solos com mais de 60% de matéria orgânica).

c) Movimento de solutos que podem ser contaminantes

O movimento de solutos no solo se dá através de vários mecanismos. Parte dos solutos pode movimentar-se transportada pela própria água que se movimenta no solo. Este mecanismo é designado como CONVECÇÃO. A quantidade transportada depende da concentração do soluto e do fluxo de água no solo que por sua vez depende da condutividade hidráulica do solo. Outro mecanismo que ocorre no solo é a DIFUSÃO MOLECULAR. Neste caso, havendo diferença de concentração do soluto dentro do solo, já é o bastante para provocar sua difusão (movimentação), mesmo que não haja movimento de água no solo. Neste caso, a quantidade transportada depende do gradiente de concentração do soluto e do coeficiente de difusão molecular (alguns produtos tendem a se difundir mais facilmente do que outros). Além disso, ainda há o transporte por DISPERSÃO MECÂNICA. Este mecanismo ocorre porque a água e soluto ao serem transportados entre partículas do solo, podem adquirir velocidades diferentes e estabelecerem frentes de avanço com grande tortuosidade, o que leva a estabelecer novas diferenças de concentração e assim favorecer a difusão, proporcionada pela dispersão do movimento. A quantidade transportada depende então do gradiente de concentração e do coeficiente de dispersão. Juntando a difusão com a dispersão, os cientistas decidiram agrupar estas formas de movimento numa única chamada de DISPERSÃO HIDRODINÂMICA.