

VALIDADE DE ALGUMAS EQUAÇÕES DE DRENAGEM PARA ESPAÇAMENTO DE DRENOS COBERTOS I. REGIME DE ESCOAMENTO PERMANENTE¹

PAULO EMÍLIO PEREIRA DE ALBUQUERQUE², PAULO AFONSO FERREIRA,
BLANOR TORRES LOUREIRO e SALASSIER BERNARDO³

RESUMO - Teorias de drenagem em regime de escoamento permanente, para obtenção de valores de espaçamento entre drenos foram testadas a partir dos parâmetros de um modelo físico de laboratório, utilizando-se dois tipos de solos de várzeas: solo mineral e solo orgânico. A condutividade hidráulica saturada de cada um dos dois tipos de material poroso foi obtida, com o próprio modelo físico, medindo-se a posição do lençol freático. O valor real do espaçamento (149,0 cm) no modelo físico foi comparado com os valores estimados por meio das teorias de Donnan-Hooghoudt, de Hooghoudt e de Kirkham, válidas para regime de escoamento permanente. Quando considerados em conjunto os dois tipos de solo de várzeas, na situação em que o tubo de dreno estava (a certa distância da camada impermeável), a teoria de Donnan-Hooghoudt foi de grande eficiência, dando um valor médio do espaçamento estimado (154,5 cm) bem próximo do real (149,0 cm) e em coeficiente de variação baixo (9,5%). Na condição em que o tubo de dreno tocava a camada impermeável, as teorias de Donnan-Hooghoudt e de Hooghoudt mostraram-se ineficazes para qualquer tipo de material poroso. A ordem de preferência das teorias foi a seguinte: Donnan-Hooghoudt, Hooghoudt, e Kirkham.

Termos para indexação: várzeas, espaçamento de drenos.

EFFICIENCY OF SOME THEORIES OF DRAINAGE FOR TILE DRAIN ESPACING I. STEADY-STATE FLOW

ABSTRACT - A physical laboratory model for determining the distance between subsurface tile drain using two soils taken from flooded low lands with a superficial water-table were used to evaluate steady-state flow theories. The soils used were: an Eutrophic Aluvial soil with a clay-loam texture, referred to as a mineral soil, and an association of a Dystrophic Humic-Gley with a Dystrophic organic soil with a sandy-clay texture, referred to as an organic soil. The model was used to obtain a saturated hydraulic conductivity from water-table measurements. These data were used to estimate drain spacing from the Donnan-Hooghoudt, Hooghoudt and Kirkham theories and compared to the model drain spacing of 149,0 cm. The Donnan-Hooghoudt theory was the most efficient, giving an average drain spacing of 154,5 cm and a low CV (9,5%) for both soils, as long as the drain tube did not come into contact with the impermeable-layer. In this case the Donnan-Hooghoudt and Hooghoudt theories were inefficient for both types of soil. In this study the order of preference of the theories evaluated were: Donnan-Hooghoudt, Hooghoudt and Kirkham.

Index terms: low lands, drain spacing.

INTRODUÇÃO

Atualmente, está comprovada a alta fertilidade dos solos de várzeas, que somam cerca de 30 milhões de hectares em todo o Brasil (Lamster 1980). Consideram-se como várzeas solos aluviais ou hidromórficos, geralmente planos e ricos em matéria orgânica, facilmente

¹ Aceito para publicação em 17 de abril de 1989.

Parte da tese do primeiro autor para obtenção do grau de M.Sc. em Eng.-Agríc., apresentada à Universidade Federal de Viçosa.

² Eng.-Agríc., M.Sc., EMBRAPA/Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo (CNPMS), Caixa Postal 151, CEP 35700, Sete Lagoas, MG.

³ Eng.-Agríc., Ph.D., Dep. de Eng. Agríc., Univ. Fed. de Viçosa, CEP 36570, Viçosa, MG.

irrigáveis, de fertilidade elevada, inundados temporariamente ou não (margens de córregos e rios, vales úmidos etc.), que apresentam, porém, nas partes mais baixas, excesso de umidade, necessitando, por isso, de drenagem, razão principal do atraso do seu aproveitamento agropecuário (Freire & Novais 1980, Lamster 1980).

A drenagem é a remoção do excesso de água acumulada no perfil ou na superfície do solo, portanto, a sua finalidade é a obtenção de condições de aeração ótimas para a produção agrícola.

Em drenagem, é de fundamental importância determinar as duas principais propriedades físicas do solo: a condutividade hidráulica saturada (K_0) e a porosidade drenável ou porosidade efetiva (f) (Cruciani 1980). A determinação da condutividade hidráulica saturada é necessária para o cálculo do espaçamento de drenos (S) em condições de regime permanente, assim como o conhecimento da porosidade drenável o é para o mesmo dimensionamento, quando as condições são de regime não-permanente.

Na drenagem do solo, inclui-se a relação entre a profundidade dos drenos (P) e o espaçamento entre eles (S). Há vários modelos matemáticos propostos para a determinação de P e S , baseados no movimento da água no solo. Dumm (1954) afirmou que os modelos matemáticos deveriam ser usados com julgamento adequado e testados com resultados obtidos de experiência anterior. Dessa forma, concluiu-se que os modelos deveriam servir, basicamente, como um meio de prever a profundidade e o espaçamento aproximados de drenos, em regiões onde ainda não se fez drenagem.

Segundo Donnan & Schwab, Engelund & Raadsma, citados por Pires (1980), o espaçamento entre linhas de drenos paralelos depende da profundidade do dreno abaixo da superfície do solo, da condutividade hidráulica do solo e da quantidade de água a ser drenada. Quando dois drenos são instalados em linhas paralelas, cada um exerce separadamente influência sobre o lençol freático (LF) até a

metade do espaçamento entre eles; nesse ponto, ocorre a menor distância da superfície do solo até o LF, profundidade considerada nas teorias de drenagem. A profundidade dos drenos é previamente definida de acordo com a combinação de fatores, tais como tipo de cultura, tipo de máquina utilizada na sua construção, tipo de solo, presença da camada impermeável (CI) e outros.

Há duas situações que caracterizam as teorias de drenagem:

1) aquela que considera o movimento da água no solo quando não há variação do valor do potencial total, isto é, escoamento em regime permanente; 2) aquela que considera o movimento da água no solo quando há variação do potencial total com o tempo, ou seja, regime não-permanente.

Em condições de regime permanente, as teorias para estimar S de uso mais corrente são as de Donnan & Hooghoudt, de Hooghoudt e de Kirkham (Pires 1980).

Schilfgaarde, citado por Pires (1980), encontrou, para drenos cobertos, uma diferença na faixa de -3 a $+39\%$ entre o valor de S calculado pela teoria de Donnan-Hooghoudt e o valor real, ao passo que, para dreno aberto, essa variação foi de -47 a -39% . Concluiu-se que, no caso de drenagem com drenos cobertos, essa teoria superestima os valores de S , quando comparados com os drenos abertos, em razão da baixa resistência provocada por esse último ao fluxo radial, limitando a subida do LF.

A teoria de Hooghoudt introduz o efeito do fluxo radial sobre os drenos, ou seja, a resistência atribuída à convergência das linhas de corrente, não considerada pela teoria de Donnan-Hooghoudt.

Talsma & Haskew (1959), trabalhando com dados de campo, provenientes de área com sistema de drenagem por tubos, verificaram que os valores de S estimados pela teoria de Hooghoudt e os reais diferiram de $-0,5\%$ a $+38,5\%$. Já Pires (1980), em experimento conduzido em laboratório, encontrou a faixa de $-55,0\%$ a $+39,2\%$, sendo o sistema de drenagem por valetas abertas.

Nwa & Twocock (1969) verificaram que a teoria de Hooghoudt superestimou o valor de S em até 302%, quando comparado com o valor real. Atribuíram essa discrepância à utilização da teoria em condições de regime não-permanente.

Wesseling (1964) verificou, teoricamente, que as teorias de Hooghoudt e de Kirkham dão resultados que diferem em menos de 5% no caso em que o escoamento na camada acima dos drenos é desprezível.

Talsma & Haskew (1959), trabalhando com drenos cobertos no campo, obtiveram valores de S estimados pela teoria de Kirkham que variaram de -2,5 a -3,2% dos valores medidos de S. A coerência de tais resultados é atribuída por eles ao fato de serem razoavelmente confirmadas as suposições básicas dessa teoria. Porém, Pires (1980) utilizou a teoria de Kirkham em condições de laboratório e drenos abertos e obteve desvios de S que variaram de -48,1 a +27,4%.

Diante da grande falta de informações sobre as propriedades hidrodinâmicas que os solos de várzeas apresentam, este trabalho teve por objetivo principal determinar a validade de três equações de drenagem para regime de escoamento permanente (Donnan-Hooghoudt, Hooghoudt e Kirkham), com dados experimentais de laboratório, quando se usavam sistemas de drenagem com tubos.

MATERIAL E MÉTODOS

Foi construído, no laboratório de Hidráulica da Universidade Federal de Viçosa, um modelo físico, que consistiu de uma caixa de madeira impermeabilizada, com dimensões internas de 49,0 cm de altura, 149,0 cm de comprimento de 10,7 cm de largura. A face posterior da caixa de madeira foi constituída de uma chapa de vidro. A face frontal, de madeira, teve colocada em sua parte externa uma folha de papel milimetrado, para o traçado de malhas de 10 x 10 cm, a partir de 5 cm para a direita e para a esquerda de um eixo vertical, traçado no centro dessa face a 5 cm do fundo da caixa. Nos nódulos dessas malhas foram feitas perfurações, para coloca-

ção de piezômetros, construídos de tubos de plástico transparentes, de 5 mm de diâmetro interno.

Os piezômetros foram colocados projetando-se cerca de 1,5 cm em relação à face interna de madeira, formando uma rede de 56 piezômetros numa área de 40 x 149 cm (Fig. 1-A). Na face externa, os piezômetros foram adaptados à forma de U. Na extremidade inferior de cada piezômetro, foi colocada uma mecha de lã de vidro, para evitar seu entupimento. As medições das cargas hidráulicas de pressão foram feitas diretamente nesses 56 piezômetros e, para obter a carga hidráulica total, tomou-se como plano de referência o fundo da caixa que simulava a presença da camada impermeável.

Num eixo vertical no centro da face frontal (Fig. 1-A e 1-C) foram feitos furos a 0, 3, 6, 12, 18, 24 e 30 cm acima do fundo da caixa, onde foram inseridos pequenos tubos de dreno de aço galvanizado, com 10,7 cm de comprimento e 0,8 cm de diâmetro interno, com perfurações de 1,6 mm de diâmetro, sendo 12 furos por cm², distribuídos uniformemente pelo tubo.

A precipitação (q) era obtida por meio de gotejamentos provenientes de um tubo de PVC, de 2,5 cm de diâmetro, perfurado de 5 em 5 cm. Em cada furo conectaram-se microtubos (do tipo usado em irrigação por gotejo) de 3 cm de comprimento. Uma das extremidades do tubo de PVC foi vedada, e a outra foi ligada a um reservatório de carga constante (sistema de Mariotte). Para precipitações menores, foram utilizados dez microtubos de 100 cm de comprimento e equidistantemente espaçados ao longo da linha central da superfície do solo. Também esses microtubos foram ligados a um reservatório de carga constante.

No lado interno da caixa foram colocados sete poços de observação, distanciados dos tubos de drenos de 1, 2, 4, 10, 20, 40 e 74,5 cm. Com isso, obtinham-se posições do perfil do lençol freático (LF) (Fig. 1-B).

O modelo descrito permitiu trabalhar com um valor de $S/2=74,5$ cm, uma camada de material poroso (d') de 40 cm, um valor de d variando de 0 até 30 cm, sendo a superfície do material de 10,7 x 149,0 cm.

Foram utilizados o solo mineral, proveniente do município de Caratinga, MG, e o solo orgânico, do município de Pouso Alegre, MG. Ambos os locais contam com projetos do Provárzeas.

Os resultados das análises granulométricas e texturais, realizadas no Laboratório de Física do Solo

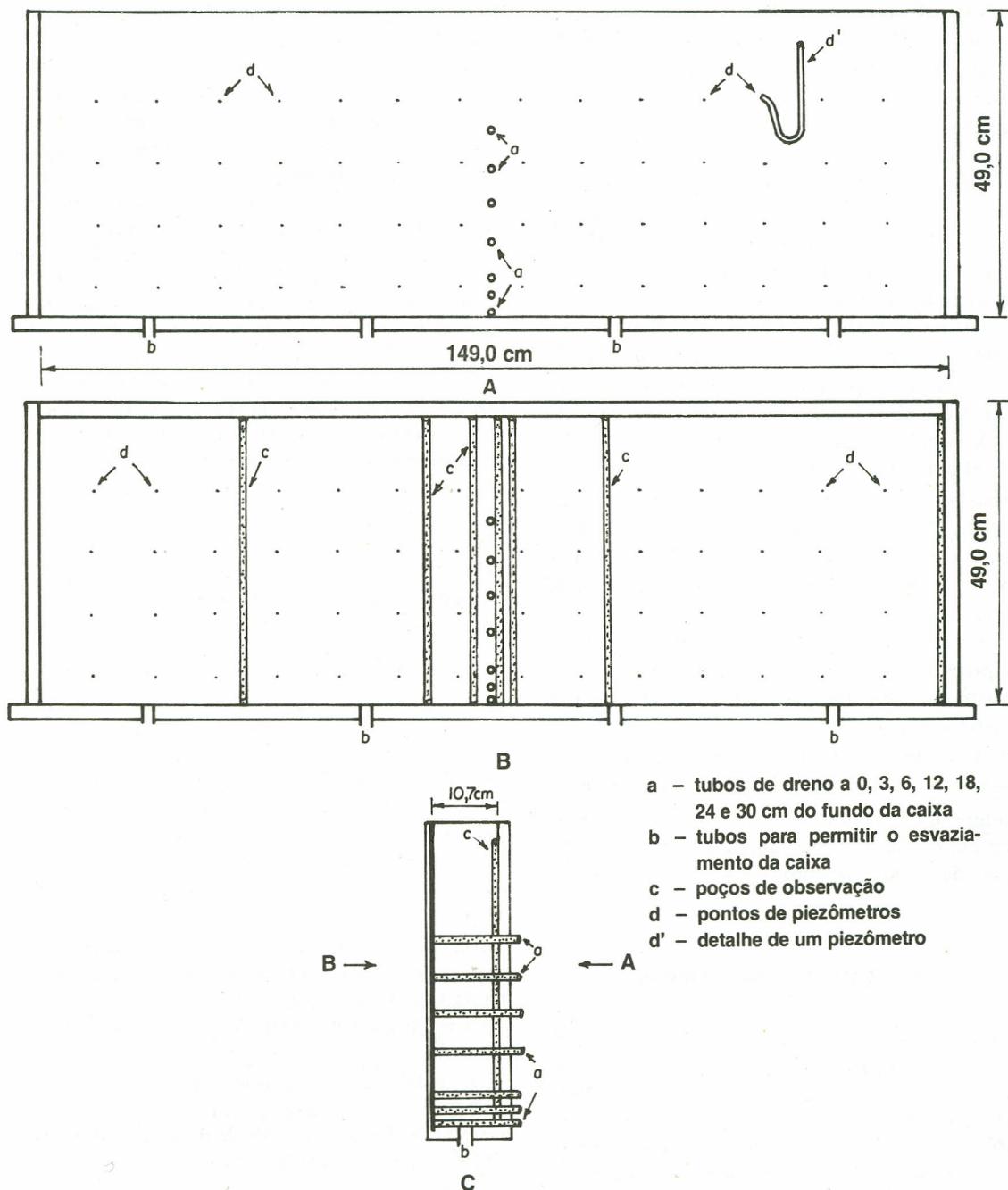


FIG. 1 - Vista do modelo físico de laboratório: A - face frontal (de madeira); B - face posterior (de vidro); C - corte lateral.

do Departamento de Solos da UFV, encontram-se na Tabela 1. O solo mineral foi preliminarmente classificado como do tipo Aluvial Eutrófico A, fraco

e moderado, e o solo orgânico, como Associação de Gley Húmico Distrófico, mais solos Orgânicos Distróficos.

TABELA 1. Distribuição granulométrica e classificação textural do material de solo mineral e orgânico.

Solo	Distribuição granulométrica (%)				Classificação textural
	areia grossa	areia fina	silte	argila	
mineral	2	37	24	37	franco-argiloso
orgânico	2	44	10	44	argilo-arenoso

Os solos, depois de secados ao ar, foram passados em peneira de malha de 4 mm de diâmetro (Nº 5). Para formar um meio homogêneo, o preenchimento da caixa foi feito em camadas de aproximadamente 5 cm, misturando-se cada camada com a precedente. As densidades globais médias foram de 1,04 g/cm³ para solo mineral de 0,62 g/cm³ para solo orgânico.

Saturado o material poroso de baixo para cima, para expulsar os gases presentes nos macroporos, efetuou-se a drenagem do sistema. Em seguida, iniciou-se a aplicação de uma precipitação com o tubo a 0 cm do fundo da caixa aberto (d=0). Depois de verificar que os piezômetros acusavam os potenciais de pressão constantes (regime permanente), lia-se, nos poços de observação, a posição do LF em relação à CI, e eram determinadas, simultaneamente, a temperatura da água e a vazão no dreno. Com isso eram obtidos o valor da distância vertical (H=Ho) do LF até a CI no semi-espaço entre drenos (S/2), a curvatura do LF e o valor do coeficiente de drenagem (q). A temperatura da água era utilizada para corrigir a viscosidade da água e portanto o valor de Ko. Tal procedimento foi realizado também para d=3, 6, 12, 18, 24 e 30 cm, para cada tipo de material poroso e intensidades diferentes de precipitação (q).

Foi utilizado um modelo matemático proposto por Kirkham (1966) na determinação da condutividade hidráulica saturada. O próprio modelo físico gerou os valores dos parâmetros necessários à solução do modelo matemático, com a ajuda de um programa de computador escrito em linguagem PL/I. Maiores detalhes do modelo matemático e sua solução são apresentados por Kirkham (1966) e Kirkham & Powers (1964).

Como K é função da viscosidade dinâmica (η) e esta varia com a temperatura, houve necessidade de corrigir o valor de Ko pela seguinte relação:

$$K_1/K_2 = \eta_2/\eta_1$$

cujos índices 1 e 2 representam valores diferentes da

temperatura e seus respectivos valores da viscosidade dinâmica (η).

Obtidos os parâmetros anteriormente descritos, fez-se a estimativa teórica de S, em condições de regime permanente. As seguintes teorias foram utilizadas:

1. de Donnan-Hooghoudt:

$$S^2 = 8.Ko.d.H/q + 4.Ko.H^2/q$$

em que

S = espaçamento entre drenos (L)

Ko = condutividade hidráulica saturada (LT⁻¹)

d = distância vertical do centro do tubo de dreno até a CI (L)

H = altura máxima do LF sobre os drenos (L)

q = taxa de precipitação (LT⁻¹)

A equação de Donnan-Hooghoudt é a equação de uma elipse, que admite como verdadeira a hipótese de Dupuit-Forchheimer, em que se pressupõe a ocorrência apenas de um fluxo horizontal para os drenos. Admite, ainda, ser o solo homogêneo, os drenos paralelos, a lei de Darcy válida, e a taxa de precipitação (q), igual ao fluxo de água que sai pelos drenos (q') (Luthin 1973, Millar 1978, Pizarro 1978, Cruciani 1980).

2. de Hooghoudt:

$$S^2 = 8.Ko.do.H/q + 4.Ko.H^2/q$$

em que

$$do = d/[2,55.(d/S).ln(d/M) + 1]$$

$$M = \pi.ro$$

$$ro = \text{raio do tubo (L)}$$

Na equação de Hooghoudt houve a substituição do valor de d por do ("extrato equivalente"), para introduzir o efeito do fluxo radial sobre os drenos. O valor de do é função de d e S e do perímetro molhado do dreno (M) (Luthin 1973, Millar 1978, Cruciani 1980).

3. de Kirkham:

$$S = \left\{ \frac{\ln(\bar{S})}{\pi \cdot r} + \sum_{N=1}^{\infty} \frac{1}{N} \left[\cos\left(\frac{N \cdot \pi \cdot r}{S/2}\right) - \cos(N \cdot \pi) \right] \cdot \left[\coth\left(\frac{N \cdot \pi \cdot d}{S/2}\right) - 1 \right] \right\}^{-1} \cdot HKo$$

em que

r = raio do tubo do dreno (L)

N = número inteiro que varia de 1 até ∞

A equação de Kirkham é citada, entre outros, por Luthin (1973), Talsma & Haskew (1959), Wesseling (1964) e Kirkham et al. (1974).

Os espaçamentos estimados foram comparados com o real a partir da seguinte expressão do desvio percentual, para cada material poroso e valor de d :

$$\text{desvio} = [(Se/Sr) - 1] \times 100$$

em que

Se = espaçamento estimado (L)

Sr = espaçamento real (L)

Os valores médios dos espaçamentos (\bar{S}) dos dois tipos de material poroso, para cada equação, foram obtidos pela expressão:

$$\bar{S}_e = \sum_{i=1}^n \frac{Se_i}{n}$$

em que n representa o número de cálculos realizados para cada equação. Quando $d = 3, 6, 12, 18, 24$ e 30 cm, $n = 26$ e também para $d = 0$, $n = 31$.

Os desvios-padrão (DP) das médias foram calculados por:

$$DP = \left[\sum_{i=1}^n (\bar{S}_e - Se_i)^2 / n \right]^{1/2}$$

e os coeficientes de variação (CV) das médias foram obtidos por:

$$CV = (DP/Se) \times 100.$$

RESULTADOS

Os parâmetros necessários ao cálculo da condutividade hidráulica saturada (Ko) para cada tipo de material poroso foram obtidos de $d = 12$ cm, ou seja, o tubo de dreno estando a 12 cm da camada impermeável. Utilizando a metodologia de Kirkham (1966), estimou-se o Ko , cujos valores foram 73,35 cm/h, a 23°C, para o solo orgânico, e 1,16 cm/h, a 23°C, para o solo mineral.

Os valores de q , H , Ho e os de Ko , corrigidos para as temperaturas da água saída dos drenos, encontram-se nas Tabelas 2 e 3.

Um programa de computador escrito em linguagem PL/I foi utilizado para estimar os espaçamentos entre drenos. Os parâmetros de entrada são os apresentados nas Tabelas 2 e 3, conforme o tipo de solo.

Nas Tabelas 4 e 5 encontram-se os desvios percentuais entre os valores estimados dos espaçamentos resultantes das teorias de Donnan-Hooghoudt, Hooghoudt e de Kirkham e o valor real de 149 cm, para cada valor de d , d/H , Ko/q , para o solo orgânico e o mineral, respectivamente.

Na Tabela 6 encontram-se os valores médios dos espaçamentos estimados (\bar{S}), dos desvios-padrão (DP) e os coeficientes de variação (CV) para as teorias citadas anteriormente.

A Tabela 7 sintetiza o número de vezes, em forma percentual, que os valores de S , independentemente do material poroso, encontram-se numa faixa de desvio percentual entre o S estimado e o real baseado numa das teorias para $d \neq 0$. Nessa tabela não foram incluídas estimativas de S quando $d = 0$. Nessa tabela não foram incluídas estimativas de S quando $d = 0$, para não haver interferência na análise comparativa entre as teorias de Donnan-Hooghoudt e Hooghoudt e a de Kirkham, que não é válida para $d = 0$.

A interpretação da Tabela 7 é a seguinte: a teoria de Donnan-Hooghoudt foi utilizada 26 vezes nos cálculos de espaçamento, quando $d \neq 0$. Em 26,9% das vezes, o desvio entre o valor estimado por ela e o real foi de $\pm 5\%$.

DISCUSSÃO

De acordo com o critério de classificação proposto por Klute (1965), o solo orgânico é classificado como material poroso de condutividade hidráulica muito rápida, e o solo mineral, de condutividade moderadamente lenta.

Deve-se ressaltar que o valor de Ko para o solo orgânico foi superestimado em cerca de 100%, e para o solo mineral, o valor foi sub-

TABELA 2. Valores observados de condutividade hidráulica saturada (K_0), intensidade de precipitação (q), altura do lençol freático no semi-espaço entre drenos até o centro do tubo (H_0), para diferentes profundidades da camada impermeável em relação ao centro do tubo de dreno (d) e diferentes faixas de intensidade de precipitação, usando solo orgânico.

Faixa de int. de precip. (cm/h)	d (cm)	K_0 (*) (cm/h)	$q \times 10^{-2}$ (cm/h)	H_0 (cm)
$0,53 \leq q \leq 3,21$	0	72,48	52,69	3,1
	18	70,78	92,58	2,3
	30	73,35	320,55	3,4
$1,51 \leq q \leq 1,69$	0	73,35	153,55	7,6
	3	73,35	157,31	6,9
	6	71,64	153,05	5,5
	12	73,35	158,82	4,4
	18	73,35	161,07	3,3
	24	69,09	150,54	2,5
$0,75 \leq q \leq 1,28$	30	73,35	168,98	2,2
	0	75,07	127,96	6,3
	3	72,48	94,59	4,5
	6	76,82	99,35	3,8
	12	71,64	81,29	2,5
	18	74,20	80,54	2,0
	24	71,64	74,52	1,4
30	75,07	85,81	1,2	

* Valores de K_0 corrigidos para as temperaturas da água saída nos drenos

estimado em cerca de 70%, quando comparados com valores obtidos das amostras de materiais de solo pelo método do permeâmetro de carga constante.

Verificando os desvios provenientes da teoria de Donnan-Hooghoudt (Tabela 4) para solo orgânico, vê-se boa homogeneidade nos dados, ocorrendo pequenas variações nos desvios, principalmente nos casos de d acima de 3 cm (d/H maior que 0,4). Isso demonstra o bom desempenho dessa teoria, para solo orgânico, nas condições do experimento, para o caso de $d \neq 0$. Examinando-se os resultados, percebeu-se que a teoria de Hooghoudt subestimou S , para qualquer relação d/H e K_0/q . Os desvios mais próximos de zero ocorreram para d entre 6 e 18 cm. Comparando as teorias de Donnan-Hooghoudt e Hooghoudt, pode-se dizer que a primeira superestimou os valores de S em relação à última em razão do efeito do

fluxo radial que essa leva em consideração.

Observando os desvios de S , oriundos das teorias de Donnan-Hooghoudt e Hooghoudt, em solo mineral (Tabela 5), vê-se que os menores desvios ocorreram para uma relação K_0/q mais baixa, particularmente para o caso da primeira teoria. Já a teoria de Hooghoudt apresentou os maiores desvios em $d = 24$ e 30 cm, para qualquer relação K_0/q . Como para o solo orgânico, pode-se observar que a equação de Donnan-Hooghoudt mostrou bom desempenho para o solo mineral, exceto para $d = 0$ e K_0/q maior, e que essa superestimou os valores de S em comparação com a equação de Hooghoudt, por causa do efeito do fluxo radial que esta última considera, principalmente para maiores valores de d/H .

Fazendo uma análise da teoria de Kirkham, válida para $d \neq 0$, vê-se, pelas Tabelas 4 e 5, que não houve boa precisão na estimativa de S

TABELA 3. Valores observados de condutividade hidráulica saturada (K_o), intensidade de precipitação (q), altura do lençol freático no semi-espaço entre drenos até o centro do tubo (H_o), para diferentes profundidades da camada impermeável em relação ao centro do tubo de dreno (d) e diferentes faixas de intensidade de precipitação, usando solo mineiral.

Faixa de int. de precip. (cm/h)	d (cm)	K_o (*) (cm/h)	$q \times 10^{-2}$ (cm/h)	H_o (cm)
$0,079 \leq q \leq 0,103$	0	1,19	8,09	20,6
	3	1,15	10,35	19,0
	6	1,24	7,90	17,6
	12	1,16	9,60	13,9
	24	1,13	7,90	7,7
	30	1,17	7,90	6,5
$0,049 \leq q \leq 0,070$	0	1,19	6,96	12,6
	3	1,16	6,96	15,0
	6	1,15	6,77	11,9
	12	1,21	6,02	10,6
	18	1,16	4,89	6,9
	24	1,21	5,46	5,9
	30	1,21	4,89	4,5
$q = 0,41$	18	1,19	4,14	6,3

* Valores de K_o corrigidos para as temperaturas da água saída nos drenos

para nenhum valor de d ; os desvios que ficaram mais próximos de zero foram predominantemente para d entre 6 e 18 cm. Segundo a teoria de Kirkham, para uma região de escoamento em que H é muito maior que d , maior será a eficiência dela em estimar o valor real de S , ou seja, mais próximo de zero estaria o desvio (Luthin 1973, Kirkham et al. 1974). Portanto, ao se analisar os dados das Tabelas 4 e 5, tal fato não ocorreu pelo fato de H ser muito maior que d , verificada na maioria dos casos. Provavelmente, por isso, houve más estimativas do valor de S .

A partir dos dados da Tabela 6, verificou-se que a teoria de Donnan-Hooghoudt, para $d \neq 0$, diferiu da de Kirkham ao estimar S em +68,8%, e que a teoria de Hooghoudt, para $d \neq 0$, diferiu da de Kirkham, na estimativa de S , em +28,9%. Wesseling (1964) afirmou que os resultados das equações de Hooghoudt e Kirkham diferiram em valores menores que 5% no caso em que o fluxo na camada acima dos drenos foi desprezada (H muito menor que d). Neste trabalho, para a relação d/H maior

ou igual a 2, a primeira teoria diferiu da última em 15,3%.

Pôde-se observar que a teoria de Donnan-Hooghoudt, para $d \neq 0$, para os dois tipos de solo, conjuntamente, resultou num valor médio de S (154,5 cm) bem próximo do real (149,0 cm), além de essa teoria estimar os valores de S de modo bem homogêneo, ou seja, os valores variaram muito pouco entre si, o que foi confirmado pelo baixo CV apresentado, 9,5%. Portanto, a teoria de Donnan-Hooghoudt foi a que forneceu melhor eficiência.

Analisando as eficiências das teorias de drenagem, por meio da Tabela 7, nota-se que as teorias de Donnan-Hooghoudt e de Hooghoudt apresentaram, em média, bom desempenho, tendo a primeira se sobressaído, para qualquer faixa de desvio percentual entre o valor de S estimado e o real. Entretanto, a teoria de Kirkham foi de baixa eficiência, apresentando dentre todas as equações, os valores mais baixos de percentagem de estimativas.

TABELA 4. Desvios percentuais entre os valores estimados de espaçamento (S) e o valor real de 149 cm, para cada altura do tubo de dreno em relação à camada impermeável (d), relações d/H (*) e Ko/q(*), usando solo orgânico.

Faixa de int. de precip. (cm/h)	d (cm)	d/H (*)	Ko/q (*)	Donnan-Hooghoudt	Teorias Hooghoudt	Kirkham
0,53 ≤ q ≤ 3,21	0	0	137,6	-51,2	-51,2	-
	18	7,8	76,5	+10,1	-20,3	-26,6
	30	8,8	22,9	-5,7	-50,7	-58,1
1,51 ≤ q ≤ 1,69	0	0	47,8	-29,5	-29,5	-
	3	0,4	46,6	13,5	-14,5	-43,2
	6	1,1	46,8	-9,9	-15,0	-33,0
	12	2,7	46,2	-1,9	-14,5	-26,6
	18	5,5	45,5	+3,2	-25,6	-34,0
	24	9,6	45,9	+2,1	-37,7	-43,8
0,75 ≤ q ≤ 1,28	30	13,6	43,4	+3,4	-45,6	-50,7
	0	0	58,7	-35,2	-35,2	-
	3	0,7	76,6	-19,3	-20,5	-41,1
	6	1,6	77,3	-8,5	-14,2	-27,9
	12	4,8	88,1	+2,6	-15,4	-22,8
	18	9,0	92,1	+12,3	-18,7	-24,2
	24	17,1	96,1	+9,5	-33,1	-36,8
	30	25,0	87,5	+7,6	-44,1	-47,0

* H - altura do lençol freático no semi-espaço entre drenos até o centro do tubo (cm)

Ko - condutividade hidráulica saturada (cm/h)

q - intensidade de precipitação (cm/h)

TABELA 5. Desvios percentuais entre os valores estimados de espaçamento (S) e o valor real de 149 cm, para cada altura do tubo de dreno em relação à camada impermeável (d), relações d/H (*) e Ko/q (*), usando solo mineral.

Faixa de int. de precip. (cm/h)	d (cm)	d/H (*)	Ko/q (*)	Donnan-Hooghoudt	Teorias Hooghoudt	Kirkham
0,08 ≤ q ≤ 0,10	0	0	14,7	+6,0	+6,0	-
	3	0,2	11,1	-2,5	-3,0	-54,4
	6	0,3	15,7	+21,4	+18,4	-30,3
	12	0,9	12,1	+7,1	-4,6	-34,8
	24	3,1	14,3	+5,2	-28,9	-45,6
0,05 ≤ q ≤ 0,07	30	4,6	14,8	+7,4	-36,4	-50,4
	0	0	17,1	-30,1	-30,1	-
	3	0,2	16,7	-2,8	-3,4	-50,1
	6	0,5	17,0	-6,7	-10,3	-41,4
	12	1,1	20,1	+15,2	+2,0	-24,4
	18	2,6	23,7	+12,5	-13,5	-30,1
	24	4,1	22,2	+12,7	-24,2	-38,1
	30	6,7	24,7	+13,8	-33,8	-44,5
q = 0,04	18	2,9	28,7	+17,4	-9,3	-25,1

* H - altura do lençol freático no semi-espaço entre drenos até o centro do tubo (cm)

Ko - condutividade hidráulica saturada (cm/h)

q - intensidade de precipitação (cm/h)

TABELA 6. Valores médios de espaçamentos estimados (\bar{S}), desvios-padrão (DP) e coeficientes de variação (CV) para os dois tipos de material poroso, para $0 \leq d \leq 30$ ($d = 0, 3, 6, 12, 18, 24$ e 30 cm) e $d \neq 0$ ($d = 3, 6, 12, 18, 24$ e 30 cm)

Teoria	\bar{S} para	DP	CV	\bar{S} para	DP	CV
	$0 \leq d \leq 30$ (cm)			$d \neq 0$ (cm)		
Donnan-Hooghoudt	146,9	24,7	16,8	154,5	14,7	9,5
Hooghoudt	117,4	24,6	20,9	119,4	23,4	19,6
Kirkham	-	-	-	92,6	15,2	16,5

TABELA 7. Percentagem das estimativas do espaçamento (S) para cada faixa de desvio percentual entre o valor de S estimado pelas teorias de regime permanente e o valor real de 149 cm.

Teoria	Desvio percentual entre o S estimado e o real					
	± 5	± 10	± 15	± 20	± 25	± 30
Donnan-Hooghoudt	26,9	61,5	84,6	96,2	100,0	100,0
Hooghoudt	15,4	19,2	42,3	53,8	65,4	73,1
Kirkham	0,0	0,0	0,0	0,0	11,5	26,9

CONCLUSÕES

1. Nas condições experimentais, a teoria de Donnan-Hooghoudt, para $d \neq 0$, foi a de maior eficiência, quando se consideraram os dois tipos de solo de várzeas, em conjunto, dando um valor do espaçamento médio estimado (154,5 cm) bem próximo do real (149,0 cm) e em baixo CV (9,5%).

2. A teoria de Kirkham apresentou a pior eficiência, sob as condições em que o trabalho se realizou.

3. As teorias de Donnan-Hooghoudt e Hooghoudt, utilizadas para avaliar o valor de S na condição em que o tubo de dreno tocava a camada impermeável ($d = 0$), mostraram-se ineficazes, particularmente para altas relações K_0/q , nos dois tipos de material poroso usados.

4. Para os dois tipos de material poroso, nos 26 cálculos de espaçamento resultantes de

cada teoria, e para $d \neq 0$, observou-se que, para um desvio percentual de até $\pm 15\%$ entre o valor estimado de S e o real, a teoria de Donnan-Hooghoudt alcançou 84,6% dos seus cálculos; a de Hooghoudt, 42,3%, e a de Kirkham, 0,0%. Para um desvio de até $\pm 30\%$ a teoria de Donnan-Hooghoudt obteve 100,0% dos seus cálculos; a de Hooghoudt, 73,1%, e a de Kirkham, 26,9%.

5. De modo geral, a ordem de preferência das teorias de drenagem, válidas para regime de escoamento permanente, foi a seguinte: Donnan-Hooghoudt, Hooghoudt e Kirkham.

REFERÊNCIAS

- CRUCIANI, D.E. **A drenagem na agricultura**. São Paulo, Nobel, 1980. 333 p.
- DUMM, L.D. Drain-spacing formula: New formula for determining depth and spacing of subsurface drains in irrigated lands. **Agric. Eng.**, 35:726-30, 1954.

- FREIRE, F.M. & NOVAIS, R.F. Solos de várzeas – características e problemas relativos à fertilidade. **Informe Agropecuário**, 65: 24-4, 1980.
- KIRKHAM, D. Steady-state theories for drainage. **Proc. Am. Soc. Civil Eng.**, 92:19-39, 1966
- KIRKHAM, D. & POWERS, W.L. An exact theory of seepage rainfall into tile and ditch drained land of finite depth. In: INTERN. CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 8, Bucharest, Romania, 1964. **Transactions**. . . Bucharest, House of the Academy of the Socialist Republic of Romania, 1964. v. 2, p. 39-44.
- KIRKHAM, D.; TÓKSOZS, S.; PLOEG, R.R. van der. Steady flow to drains and wells. In: SCHILFGAARDE, J. van. **Drainage for agriculture**. Madison, American Society of Agronomy, 1974. part V. (Agronomy, 17).
- KLUTE, A. Laboratory measurement of hydraulic conductivity of saturated soil. In: BLACK, C.A. **Methods of soil analysis**. Madison, American Society of Agronomy, 1965. part I. (Agronomy, 9).
- LAMSTER, E.C. Programa nacional de aproveitamento racional de várzeas – Provárzeas nacional. **Inf. Agropec.**, 65:3-8, 1980.
- LUTHIN, J.N. **Drainage engineering**. New York, Robert E. Krieger Publishing Co. Huntington, 1973. 250 p.
- MILLAR, A.A. **Drenagem de terras agrícolas: bases agronômicas**. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1978. 250 p.
- NWA, E.U. & TWOCOCK, J.G. Drainage design theory and practice. **J. of Hydrology**, 9:259-76, 1969.
- PIRES, E.T. **Redes de fluxo de água e dimensionamento de sistemas de drenagem, usando três tipos de solos**. Viçosa, UFV, 1980. 67 p. Tese Mestrado.
- PIZARRO, D. **Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos**. Madrid, Agrícola Española, 1978. 525 p.
- TALSMA, T. & HASKEW, H.C. Investigation of water-table response to tile drains in comparison with theory. **J. of Geophys. Research**, 64:1933-44, 1959.
- WESSELING, J. A comparison of the steady state drain spacing formulas of Hooghoudt and Kirkham in connection with design practice. **J. of Hidrology**. 2.25-32, 1964.