

DETERMINAÇÃO A CAMPO DA POROSIDADE DRENÁVEL UTILIZANDO MODELOS MATEMÁTICOS COM BASE NO FLUXO DE DRENAGEM

Antonio Ricardo Santos Andrade; Ivan Amaral Guerrini; Marcio Furlan Maggi; Wagner Martins da Cunha Vilella

Departamento de Engenharia Rural, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP, arsa@fca.unesp.br

1 RESUMO

Este estudo objetivou estimar da porosidade drenável por meio de equações de estimativa utilizando dados de carga hidráulica e descarga de drenos medidos obtidos a campo. O experimento foi conduzido em solos aluviais da área experimental do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrônômicas – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP. Em uma área piloto, foram caracterizadas as propriedades hidráulicas do solo, determinado a carga hidráulica e descarga dos drenos subterrâneos. Os dados foram analisados com o uso das equações de Hooghoudt, para fluxo permanente, e a de Glover-Dumm, para fluxos não permanentes. Nas condições locais deste estudo a equação para fluxo permanente não permitiu uma boa estimativa da porosidade drenável na profundidade que contribui para o fluxo aos drenos. O uso da equação para fluxo não permanente proporcionou um valor de porosidade drenável mais próxima de um valor médio representativo desta propriedade para o dimensionamento de sistema de drenagem, quando comparado ao método de laboratório (mesa de tensão). Contudo, e devido à variabilidade espacial textural do solo ser ampla, vindo a dificultar a estimativa de valores mais representativos da porosidade drenável a ser utilizados nas equações para o dimensionamento de drenos. Assim, um grande número de medições pode ser requerido em condições de recarga e carga hidráulica, para levar em conta esta variabilidade, permitindo, portanto, uma estimativa mais fidedigna da porosidade drenável, no sentido de definir o melhor procedimento de análise dos resultados.

UNITERMOS: Equações de drenagem, carga hidráulica, coeficiente de descarga.

**ANDRADE, A. R. S.; GERRINI, I. A.; MAGGI, M. F.; VILELLA, W. M. C. FIELD
ESTIMATE OF DRAINABLE POROSITY USING MATHEMATICAL MODELS BASED ON
THE DRAINAGE FLOW**

2 ABSTRACT

This study aimed to determine the drainable porosity through estimate equations using field data from hydraulic head charge and drain discharge. The experiment was carried out in an alluvial soil area at the Agricultural Engineering Department in the School of Agronomy Sciences of Paulista State University, Botucatu, SP, Brazil. In an experimental area, the hydraulic properties of the soil were characterized through the hydraulic head charge and discharge of the underground drains. The

data were analyzed with the use of Hooghoudt equations for steady-state flow and Glover-Dumm equation for non-steady-state flow. Under local conditions, the figures for steady-state flow did not allow a good estimate of the drainable porosity in the depth that contributes to the flow towards the drains. When compared to laboratory method (tension table), using an equation for non-steady-state flow, to calculate the dimension of drainage systems, provided a drainable porosity value closer to the significant average value of this property. However, and because the spatial and textural soil variability be wide, it is more difficult to estimate more significant values for drainable porosity to be used in equations for the drain dimensioning. Therefore, to take this variability into consideration and, thus, allow a more accurate estimate for drainable porosity in order to define the best procedure for result analysis, a large number of tests, under conditions of recharge and hydraulic head can be requested.

KEYWORDS: drainage equations, hydraulic head charge, discharge coefficient

3 INTRODUÇÃO

A porosidade drenável, também chamada de macroporosidade ou ainda espaço poroso drenável, invariavelmente aparece nas equações de projetos de drenagem derivadas com base na teoria do regime permanente e não permanente. Devido às dificuldades nas estimativas e nas aplicações destas teorias, a porosidade drenável é assumida como constante na maioria dos casos. Embora a preocupação de atribuir um valor constante à porosidade drenável seja muito utilizada no dimensionamento de projetos de drenagem, a hipótese de continuidade tem sido descartada (ZHANG, 1986).

Investigações a campo evidenciam que a porosidade drenável varia com a profundidade do lençol freático (NF) ou com a carga hidráulica (BUCKLAND et al., 1986; QUEIROZ, 1997). Quando outras condições não causam variação, a porosidade drenável aumenta com o aumento da profundidade do lençol freático (NF). Determina-se em laboratório pela diferença entre o conteúdo de água na saturação e na capacidade de campo (PIZARRO, 1983; BELTRAN, 1986; MILLAR, 1988). A variabilidade espacial do solo e o pouco volume de solo envolvido nesses procedimentos constituem um problema a ser considerado quando da definição de um valor representativo da porosidade drenável para

dimensionamento de sistemas de drenagem subterrânea.

A determinação da porosidade drenável em áreas experimentais de drenagem pode ser feita por meio de medições simultâneas das cargas hidráulicas (h) e da descarga de drenos (q), onde os resultados obtidos são mais representativos em condições reais estudadas, por envolver um volume maior de solo para as determinações, o que contribui para a redução da variabilidade espacial dos dados (QUEIROZ, 1997). Por meio dos métodos tradicionais de laboratório pode-se reunir informações de todos os parâmetros requeridos, mas em condições de acentuada variabilidade do perfil do solo é desejável apoiar-se em resultados de campo. A vantagem dos testes de campo é a coleta em pouco tempo de um grande número de informações, tais como: condutividade hidráulica, capacidade de armazenamento e espessura do aquífero, além do fornecimento de informações sob as condições experimentais de profundidade e espaçamento de drenos (AMORIM, 1995).

Existem várias expressões matemáticas que descrevem o fluxo de água subterrâneo para as linhas de drenos paralelos (WESSELING, 1973; van SCHILFGAARD, 1974; RAADSMA, 1974; EL-MOWELHI & van SCHILFGAARD, 1982). Estas expressões são baseadas em simplificações das condições de campo e do regime do fluxo de água em direção aos drenos. Porém, há duas expressões amplamente empregadas no delineamento e

testes de sistemas de drenagem: a de Hooghoudt (RAADSMA, 1974) para condições de fluxo permanente e de Glover-Dumm (WESSELING, 1973) para fluxo não permanente, sendo suas limitações discutidas por Prevedello (1996).

Este estudo teve como objetivo estimar a porosidade drenável por meio de equações utilizando dados de carga hidráulica e descarga de dreno obtidos a campo.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido em área experimental do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, localizado no município de Botucatu, SP. A área experimental possui aproximadamente 16.000 m² de várzea agricultável, onde nos períodos chuvosos os problemas relativos à drenagem são agravados pela contribuição de águas provenientes de uma encosta à montante e de um ribeirão à jusante (Figura 1).

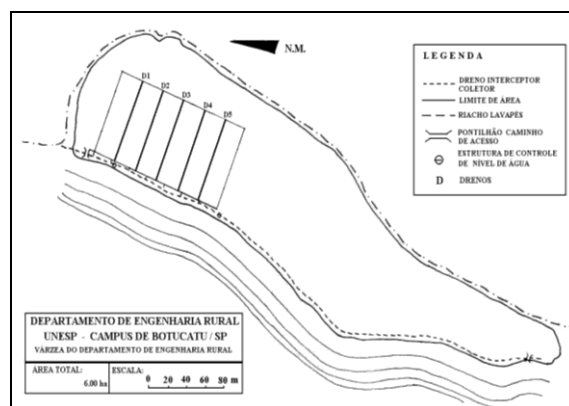


Figura 1. Localização da área experimental.

O solo da área experimental de várzea classificado como aluvial apresentando uma camada de textura argilosa na profundidade de 0,6m a 0,9m e textura média na profundidade 0,90m a 1,20m. As propriedades físicas e hídricas do solo na área do projeto como: densidade do solo (D_s), condutividade hidráulica saturada (K_o) e porosidade drenável (μ) foram determinadas usando os métodos do anel volumétrico, método do poço e mesa de tensão, respectivamente (EMBRAPA, 1997). Os valores médios destas propriedades para as duas profundidades analisadas são apresentados na Tabela 1. Na Tabela 1 é possível observar a alta porcentagem de areia e moderada porcentagem de argila, bem como o acréscimo da porcentagem de areia com o aumento da profundidade, atingindo o valor mais elevado na camada de 0,90m a 1,20m de profundidade.

Tabela 1. Características físicas e hídricas do solo da área experimental.

Prof. (cm)	Porcentagem de partículas (%)			Classe textural	K_o^1 (m.dia ⁻¹)	D_s^2 (g.cm ⁻³)	μ^3 (%)
	Areia	Silte	Argila				
60-90	43,98	15,30	40,72	Argila	3,01	1,38	8,63
90-120	56,96	11,48	31,70	Média	2,88	1,40	8,40

1. Condutividade hidráulica saturada; 2. Densidade do solo; 3. Porosidade drenável

Para os testes de carga hidráulica e descarga de drenos foram instalados poços de observação na área piloto. A Figura 2 apresenta o mapa esquemático da área piloto indicando as linhas de drenos, o coletor de campo e a distribuição de poços de observação. Os poços foram instalados em três linhas de poços transversais ao eixo dos drenos a partir da

metodologia sugerida por Dielement & Trafford (1984), conforme ilustra a Figura 2. A primeira linha foi instalada à 1/4 inicial do comprimento do dreno e as demais linhas de poços espaçadas de 1/4 do comprimento desta posição, isto é, a segunda bateria na metade (1/2) e a terceira a 3/4 do comprimento do dreno. A rede de poços, num total de 25, obedeceu a seguinte

distribuição: (1) poços na distância intermediária entre as linhas dos drenos (metade do espaçamento entre drenos) para observar a carga hidráulica; e para verificar o seu funcionamento (2) poços a 5m do dreno; (3) poços a 1,5m do dreno; (4) poços a 0,5m do dreno e (5) poços sobre o tubo do dreno intermediário (D₃). Duas linhas de tubos de drenos de contorno D₁ e D₅ foram instalados na área piloto para evitar o fluxo lateral proveniente das encostas à montante e de um ribeirão à jusante. Foram usados tubos de PVC de 0,025m de diâmetro, instalados até a profundidade dos drenos de 1,10m, com espaçamento entre drenos de 7m.

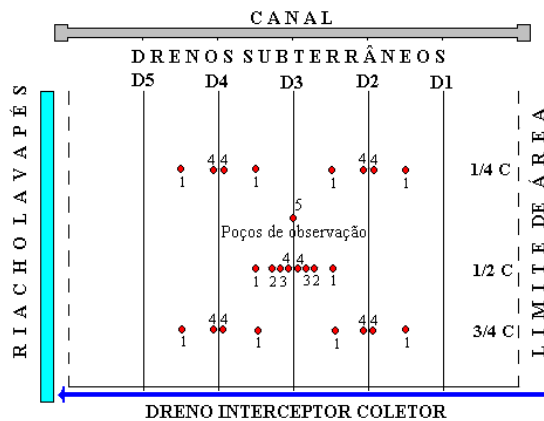


Figura 2. Mapa esquemático da área experimental indicando as linhas de drenos e a distribuição de poços de observações.

Foram realizados três testes de descarga dos drenos, sendo que para cada teste a área piloto foi previamente recarregada, através do fechamento dos drenos coletores e das linhas de drenos subterrâneos por meio de tampas plásticas. Durante quinze dias inundou-se a área, sendo necessário construir diques internos com a finalidade de obter melhor distribuição da água. Uma vez completado o período de recarga, foram realizadas medidas simultâneas, a cada duas horas durante um período de três dias, da profundidade do lençol em todos os poços e das vazões nas cinco linhas de drenos. A profundidade do lençol foi medida com fita métrica e a vazão mediante o método volumétrico usando balde calibrado e cronômetro.

As vazões obtidas em $L.s^{-1}$ foram convertidas em $m.dia^{-1}$, por meio da seguinte relação:

$$q = \frac{Q \cdot 10^{-3} \cdot 86.400}{C \cdot L} \quad (1)$$

onde: q = descarga normativa do dreno em $m.dia^{-1}$; Q = Descargas medidas nos drenos ($L.s^{-1}$); C = comprimento do dreno (m) e L = espaçamento entre os drenos (m).

Os dados de profundidades do lençol freáticos foram convertidos em valores de carga hidráulica por meio da seguinte expressão:

$$h = (CoTp - PrLF) - CoDr \quad (2)$$

onde: h = carga hidráulica no ponto intermediário entre os drenos (m); $CoTp$ = cota topográfica do topo do poço (m); $PrLF$ = profundidade do lençol freático a partir do poço (m) e $CoDr$ = cota topográfica do plano do nível de drenagem (m).

Analisando o fluxo da água para os drenos como uma situação de fluxo permanente, obtém-se uma relação conhecida como equação de Hooghoudt (RAADSMA, 1974), apresentada da seguinte forma:

$$q = \frac{8K_o d h}{L^2} + \frac{4K_o h^2}{L^2} \quad (3)$$

onde: q = descarga normativa ($m.dia^{-1}$); K_o = condutividade hidráulica saturada ($m.dia^{-1}$); d = espessura do extrato equivalente (m); h = carga hidráulica no ponto intermediário entre os drenos (m) e L = espaçamento entre os drenos (m).

O primeiro termo a direita da equação (3) representa o fluxo abaixo da linha do dreno, enquanto o segundo corresponde à componente de fluxo acima do dreno. Em um sistema de drenagem já instalado, a condutividade hidráulica saturada (K_o) e os parâmetros d e L são constantes para cada mancha de solo com características físicas semelhantes, e os parâmetros q e h variam no tempo e no espaço. A equação (3) pode, então ser escrita da seguinte forma:

$$q = Ah + Bh^2 \quad (4)$$

A equação (4) representa uma curva, podendo ser linearizada dividindo-se todos os termos por h, conforme a seguir:

$$\frac{q}{h} = A + Bh \quad (5)$$

onde:

$$A = \frac{8K_o d}{L^2} \quad (6)$$

$$B = \frac{4K_o d}{L^2} \quad (7)$$

Aplicando na equação (4) a teoria do método dos mínimos quadrados, e estabelecendo uma regressão nos valores de q/h e h, pode-se obter os coeficientes linear (A) e angular (B), por meio das expressões:

$$A = \frac{\left[\left(\sum \left(\frac{q}{h} \right) \right) \left(\sum h^2 \right) - \left(\sum h \right) \sum \left(h \left(\frac{q}{h} \right) \right) \right]}{N \sum h^2 - \left(\sum h \right)^2} \quad (8)$$

$$B = \frac{\left[\left(N \sum \left(h \left(\frac{q}{h} \right) \right) \right) - \left(\sum h \right) \left(\sum \left(\frac{q}{h} \right) \right) \right]}{N \sum h^2 - \left(\sum h \right)^2} \quad (9)$$

Conhecendo-se os valores de A e B pode-se determinar valores para K_o e d, por meio das equações (6) e (7), permitindo uma análise do sistema projetado com o uso de uma solução analítica. Os coeficientes linear e angular da equação (4), também podem ser determinados graficamente, o que consiste em plotar em papel milimetrado, os dados de q/h no eixo da ordenada e h no eixo da abscissa, e em seguida traçar uma reta ajustada ao conjunto de pontos marcados. A inclinação dessa reta (tangente do ângulo de inclinação) representa o coeficiente angular (B) e o ponto de interseção da mesma com o eixo da ordenada, corresponde ao coeficiente linear (A). Desta forma, pode-se

fazer um cálculo estimado dos valores da K_o e d a partir dos dados medidos a campo.

No caso de fluxo não permanente a norma de drenagem consiste em rebaixar o lençol freático de uma profundidade inicial (h_o) para uma profundidade final (h_t), num intervalo de tempo de três dias. Para descrever esta situação, a relação entre a carga hidráulica e o tempo de rebaixamento do lençol freático é do tipo exponencial (DIELEMENT & TRAFFORD, 1984), conforme a seguinte expressão:

$$\frac{h_t}{h_o} = e^{-\alpha.t} \quad (10)$$

onde: α = fator de reação ou de intensidade (dias^{-1}) e t = tempo de rebaixamento (dia).

A equação (10) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$h_t = h_o.e^{-\alpha.t} \quad (11)$$

A expressão (11) representa a equação da curva da carga hidráulica em função do tempo, que é conhecida como equação de Glover-Dumm (DIELEMENT & TRAFFORD, 1984). Este mesmo raciocínio pode ser aplicado para a descarga normativa, ou seja:

$$q_t = q_o.e^{-\alpha.t} \quad (12)$$

onde: q_o = recarga inicial (m) e q_t = recarga final no tempo de rebaixamento (m).

Aplicando-se o processo de linearização, multiplicando logaritmo (ln) em ambos os membros da equação (11) obtém-se a seguinte expressão:

$$\alpha = \frac{2,3 \ln \left(\frac{h_o}{h_t} \right)}{t} \quad (13)$$

onde: h_o = altura inicial do lençol freático (m); h_t = altura final do lençol freático (m) e t tempo de rebaixamento do lençol de h_o para h_t (em 3 dias). O mesmo processo de linearização pode ser aplicado na equação (12) resultando na expressão:

$$\alpha = \frac{2,3 \ln\left(\frac{q_o}{q_t}\right)}{t} \quad (14)$$

Como o fator de reação na equação de Glover-Dumm é diretamente proporcional a transmissividade ($K_o \cdot d$) e inversamente proporcional à porosidade drenável (μ) e ao espaçamento entre os drenos (L), tem-se:

$$\alpha = \frac{\pi^2 \cdot K_o \cdot d}{\mu \cdot L^2} \quad (15)$$

Para o fluxo não permanente há proporcionalidade entre a recarga normativa (q) e a carga hidráulica (h) que depende do fator de reação (α) e da porosidade drenável (μ), conforme expressão a seguir:

$$\frac{q}{h} = \frac{2\pi K_o d}{L^2} = \frac{2\alpha\mu}{\pi} \quad (16)$$

Portanto, a partir dos dados de carga hidráulica, descarga normativa e do espaçamento, pode-se determinar o fator de reação pelas equações (13) e (14) e a porosidade drenável pela equação (15), principal objetivo deste trabalho. Uma solução gráfica pode ser aplicada, onde os dados da carga hidráulica (h) e da descarga normativa (q) versus o tempo (t), podem ser plotados num papel monolog para ter-se um ajuste linear do conjunto de pontos. Onde o fator de reação é dado pela tangente do ângulo de inclinação da reta (θ), o qual substituído nas equações (13) e (14), obtém-se:

$$\alpha = 2,3 \tan\theta \quad (17)$$

$$\text{onde: } \tan g\theta = \frac{\ln(h_o)}{\ln(h_t)} \quad \text{ou} \quad \tan g\theta = \frac{\ln(q_o)}{\ln(q_t)}$$

Calculando o valor de α pela equação (17) baseado em dados de carga hidráulica (h) e na descarga normativa (q) e, juntamente com valores de condutividade hidráulica do solo saturado (K_o), espessura do extrato equivalente (d) e o espaçamento entre os drenos (L) pode-se

determinar a porosidade drenável pela equação (15).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 3, são apresentados os dados da taxa de descarga e carga hidráulica em função do tempo que corresponde ao dreno intermediário D_3 da área experimental. Utilizou-se o dreno do meio para evitar o efeito de bordadura na eficiência da descarga. A descarga neste teste varia consideravelmente de um dreno para outro. A variação da descarga acumulada é um reflexo da heterogeneidade do perfil dos solos aluviais.

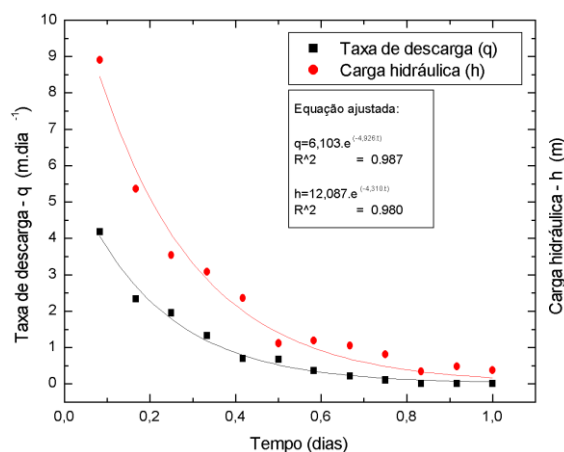


Figura 3. Taxa de descarga e carga hidráulica em função do tempo.

A análise da Figura 3 indica que a vazão e a carga hidráulica diminuíram rapidamente com o tempo. A taxa de descarga diminuiu $0,0031 \text{ m.dia}^{-2}$ do primeiro dia até o fim do teste. A carga hidráulica diminuiu mais rapidamente durante o primeiro dia a uma taxa de $0,042 \text{ m.dia}^{-1}$, até o fim do teste.

Na Figura 4 é apresentada a mesma informação da Figura 3, onde o eixo das ordenadas se encontra em escala logarítmica. Mediante esse gráfico pode-se estimar o fator de reação de drenagem (α). Da análise matemática, se deduz que o valor de α deve ser idêntico, seja usando a informação da taxa de descarga, ou de carga hidráulica, o que implica

que ambas as retas devem ser paralelas. As retas da Figura 4 não são paralelas, sendo isso observado, o que dificultou para cálculo de α sendo o coeficiente angular da reta igual a fator de reação determinado pela equação (16).

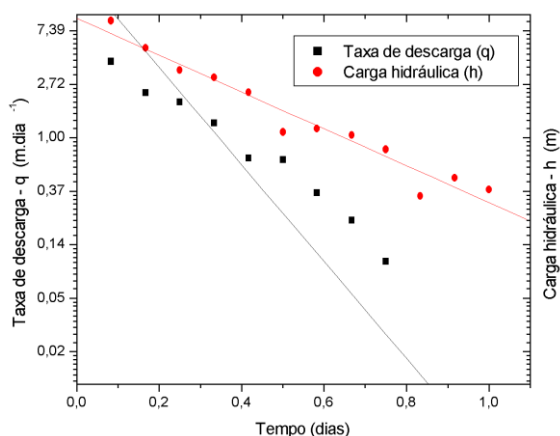


Figura 4. Taxa de descarga e carga hidráulica em função do tempo, em escala logarítmica.

Tabela 2. Comparação da porosidade drenável determinada pelo método de laboratório (mesa de tensão) e pelo método de campo utilizando-se dados de carga hidráulica e descarga normativa.

Métodos	Fator de reação (dias ⁻¹)- α	Porosidade drenável (%)- μ
Baseado na carga hidráulica	7,92	6,74
Baseado na descarga normativa	20,85	2,55
Método da mesa de tensão	6,35	8,40

Pela Tabela 2, observa-se variação nos valores da porosidade drenável de 2,55% a 8,40%. Considerando a porosidade drenável obtida pelo método da mesa de tensão como referência de (100%), constata-se uma diminuição de 19,76% na porosidade drenável quando estimada em relação ao método baseado na carga hidráulica, e posterior diminuição de 69,64% em relação ao procedimento baseado na descarga normativa (q). Essa diferença se deve também a erros de aproximação do ajuste na obtenção do coeficiente angular da reta para cálculo de $\alpha = \tan\theta$ e a falta de concordância dos valores de α determinados pelos dois procedimentos. Os resultados demonstram que os dois procedimentos subestimam os valores da porosidade drenável em relação ao método de laboratório (mesa de tensão) considerado método padrão, sendo o erro mais significativo em relação ao método baseado na descarga normativa (q). Vale ressaltar que no

Usando-se os dados de carga hidráulica obtém-se que $\tan\theta = 3,446$, portanto $\alpha = 2,3 \cdot 3,446 = 7,925$ dias⁻¹ e, usando-se a taxa de recarga, obteve α igual a 20,85 (Tabela 2). A falta de concordância dos valores de α deve-se, provavelmente, à grande variabilidade espacial do solo da área piloto. Considerando-se a natureza dinâmica do processo, o valor mais adequado deve ser determinado por meio dos dados das taxas de descargas, já que os valores de carga hidráulica estão mais sujeitos a erros devido à variabilidade espacial do solo.

De posse dos valores do fator de reação (α), juntamente com os da condutividade hidráulica do solo saturado (K_0), da espessura do extrato equivalente (d) e do espaçamento, pode-se estimar a porosidade drenável por meio da equação (17) onde os valores são apresentados na Tabela 2.

método de laboratório, o pequeno volume de solo amostrado para cálculo da porosidade drenável é um fator que colabora para aumento do erro nos dados, sendo preferível devido a sua simplicidade, menor exigência de material e pequeno custo. Por sua vez, o uso dos métodos de campo, que se baseiam na descarga e carga hidráulica, os quais são representativos de um volume maior de solo, o que diminui o efeito da variabilidade espacial do solo e proporciona maior precisão nos resultados.

Na Figura 5 apresentada a relação entre a descarga (q) e carga hidráulica (q). Este gráfico é importante, pois permite calcular a condutividade hidráulica do solo saturado (K_0), baseada na hipótese de que o fluxo de água em direção aos drenos seja permanente e na equação (3) conhecida como equação de Hooghoudt (RAADSMA, 1974) que na forma simplificada tem a forma da equação (5).

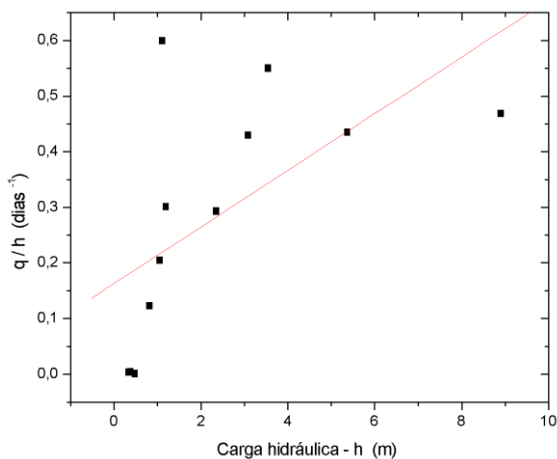


Figura 5. Relação entre a recarga normativa e carga hidráulica (q/h) em função da carga hidráulica.

Como foi evidenciada, a relação entre q e h é da forma linear $q/h = A + B.h$, sendo A o coeficiente linear e B o coeficiente angular da reta. A partir da Figura 5, obtém-se $A = 0,163$, e usando a equação (5), determinou-se $K_0 = 1,08 \text{ m.dia}^{-1}$, valor este relativamente próximo do obtido pelo método do poço a campo (Auger Hole), igual a $2,88 \text{ m.dia}^{-1}$.

6 CONCLUSÕES

Os procedimentos propostos neste estudo não se mostraram satisfatórios na estimativa da porosidade drenável a partir de medidas da carga hidráulica e da descarga normativa quando comparados ao método da mesa de tensão.

O valor de K_0 estimado com base no procedimento da recarga normativa e na carga hidráulica para fluxo permanente é menor que o obtido pelo método do poço a campo.

Os valores do fator de reação (α) calculados com objetivo de determinar a porosidade drenável têm comportamentos diferenciados.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, V. B. **Diagnóstico e avaliação de desempenho de drenagem subterrânea no perímetro irrigado de Bebedouro-PE**. 1995. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.

BELTRAN, J. M. **Drenaje Agrícola**. Madrid: Iryda, 1986. 239 p.

BUCKLAND, G. D.; HARKER, D. B.; SOMMERFELDT, T. G. Comparison of methods for determining saturated hydraulic and drainable porosity of two southern Alberta soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 66, p. 249-259, 1986.

DIELEMANT, P. J.; TRAFFORD, B. D. **Drainage testing**. Rome: FAO, 1984. 80p. (Irrigation and drainage paper 28).

EL-MOWELHI, N. M.; Van SCHILFGAARDE, J. Computation of soil hydrological constants from field drainage experiments in some soils of Egypt. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**. v. 25, p. 984-986, 1982.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa em Solos. **Manual nacional de pesquisa de solos**. 2ed., Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1997. 212 p (EMBRAPA-CNPS, Documentos, II).

MILLAR, A. A. **Drenagem de terras agrícolas: bases agronômicas**. São Paulo: Editerra, 1988. 306 p.

MILLAR, A. A.; GOMES, P. C. F. Determinação das propriedades de solo aluviais através da descarga de drenos subterrâneos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, n. 2, p.181-186, 1978.

PIZARRO, F. **Drenagem na agricultura**. 2.ed, São Paulo: Nobel, 1983. 337 p.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba: Editora SAEFS, 1996. 446 p.

QUEIROZ, J. E. Um novo método de cálculo de porosidade drenável. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 1, n. 1, p. 117-119, 1997.

RAADSMA, S. Current draining practices in flat areas of humid regions in Europe. In: van SCHILFGAARDE, J. (Ed.) **Drainage for agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1974. p. 115-143. (Agronomy Series 17).

van SCHILFGAARDE, J. Non-steady flow to drains. In: Van SCHILFGAARD, J. (Ed.). **Drainage for agriculture**. Madison: American

Society of Agronomy, 1974. p. 245-270. (Agronomy Series 17).

WESSELING, J. Subsurface flow into drains. In: International Institute for Land Reclamation and Improvement (Ed.) **Drainage principles and applications**. Holland, 1973. v.2,p.2-56.

ZHANG, W. New drainage formulas considering delayed gravity response and evaporation from shallow water table. In: LAND DRAINAGE INTERNATIONAL CONFERENCE, 2nd, 1986, Southampton **Proceedings...**New York: 1987. p 35-47