



Relações matemáticas entre porosidade drenável e condutividade hidráulica do solo saturado

Kátia D. Ribeiro¹, João M. S. do Nascimento², Natalino M. Gomes³, Luiz A. Lima² & Stélio M. Menezes²

RESUMO

A estimativa de algumas propriedades do solo através do uso de equações empíricas apresenta-se importante para redução do tempo e custo das análises laboratoriais, especialmente para aplicação rápida e precisa desses valores em projetos agrícolas, razão por que se objetiva, com este trabalho, testar e avaliar alguns modelos matemáticos existentes na literatura para estimativa da porosidade drenável em função da condutividade hidráulica do solo saturado. Trabalhou-se, então, com a camada superficial (0-15 cm) de solos da sub-bacia do Ribeirão Marcela (município de Nazareno, MG), utilizando-se 165 pontos amostrais. A equação proposta por Poulsen et al. (1999a) foi a que melhor se ajustou, indicando os menores valores de erro padrão de estimativa.

Palavras-chave: propriedades físico-hídricas do solo, modelos matemáticos, erro padrão de estimativa

Mathematical relationships between drainable porosity and saturated soil hydraulic conductivity

ABSTRACT

The estimative of some soil properties using empirical equations is important for reducing time and costs of laboratorial analysis, especially for rapid and precise application of these values in agricultural projects. The objective of this work was to test and evaluate some mathematical models presented in the literature to estimate drainable porosity as a function of saturated soil hydraulic conductivity. Drainable porosity and hydraulic conductivity were measured in 165 samples from the superficial layer (0-15 cm) of soils from the Marcela Brook Sub-Basin (Nazareno, Minas Gerais, Brazil). The equation developed by Poulsen et al. (1999a) presented the best results and the smallest error values.

Key words: soil physical-hydraulic properties, mathematical models, estimative error

¹ Doutoranda do PPGEA/UFLA, CP 3037, CEP 37200-000, Lavras, MG. Fone: (35) 3829-1362, Fax: (35) 3829-1482. E-mail: katiadr@bol.com.br

² Departamento de Engenharia/UFLA, Fone: (35) 3829-1481, Fax: (35) 3829-1482. E-mail: jmarceloagricola@yahoo.com.br, lalima@ufla.br, stelio@ufla.br

³ EAFAJT, CP 09, Distrito de Cerâmica, Zona Rural, CEP 46430-000, Guanambi, BA. Fone: (77) 3459-2100. E-mail: natalagricola@yahoo.com.br

INTRODUÇÃO

Para fins de drenagem subterrânea, a condutividade hidráulica do solo saturado e a porosidade drenável são os parâmetros do solo de maior interesse, tanto para utilização nas equações de dimensionamento do sistema quanto para estudos de modelos matemáticos com vistas à predição da altura do lençol freático no espaço entre linhas de drenos paralelos; portanto, a seleção de seus valores para uso nos cálculos de drenagem constitui um aspecto de fundamental importância, o que requer uma análise criteriosa dos dados (Queiroz, 1995).

A condutividade hidráulica é uma das variáveis de maior relevância para estudos do movimento de água e solutos no solo e de fundamental influência na elaboração de projetos de irrigação e drenagem, quantificação da erosão e lixiviação de substâncias químicas (Mesquita, 2001). Para tornar mais explícita sua importância, ressalta-se que a determinação incorreta da condutividade hidráulica em projetos de drenagem, pode levar a subestimativas ou superestimativas no espaçamento de drenos para uma mesma área, com toda consequência sobre custos e eficiência da drenagem que possa ocorrer (Queiroz, 1995).

A porosidade drenável, porosidade efetiva, porosidade livre de água ou macroporosidade, representa o volume de poros do solo no qual a água se move livremente (Queiroz, 1995). Responsável pela drenagem e aeração do solo, a porosidade drenável é uma propriedade significativa para o manejo e estudo de fluxos hidráulicos no solo, sendo vital na modelagem da contaminação do lençol freático e na drenagem propriamente dita (Queiroz, 1997).

A porosidade drenável, cujo valor equivale ao conteúdo de ar presente no solo na capacidade de campo, pode ser determinada pela diferença entre a porosidade total, ou umidade de saturação, e o conteúdo de água correspondente à capacidade de campo. Mediante esta definição, percebe-se que a determinação da porosidade drenável envolve o problema de que a capacidade de campo não é um valor precisamente definido no solo (Queiroz, 1995).

Uma vez que a porosidade drenável equivale à macroporosidade do solo, os métodos comumente empregados em laboratório, para determinação da macroporosidade, se baseiam na teoria da capilaridade (Galdino, 1988), porém, como não existe uma mudança bem definida na distribuição do tamanho de poros do solo, a escolha de um limite inferior para o tamanho de macroporos é um tanto arbitrária; logo, para a determinação da porosidade drenável (macroporosidade) alguns autores sugerem a aplicação de uma tensão de 6 kPa e vários outros já aconselham a aplicação de uma tensão de 10 kPa (Otto, 1988).

Em condições de campo a porosidade drenável é obtida em função do rebaixamento do lençol freático e da lâmina de água correspondente a esse rebaixamento, cuja metodologia para determinar o valor real da porosidade drenável é onerosa, demorada e complexa (Pizarro, 1978).

Em virtude da dificuldade de se padronizar um valor para a capacidade de campo do solo ou um limite inferior para o tamanho dos macroporos e diante da complexidade do mé-

todo utilizado em campo, tem-se buscado estimar a porosidade drenável a partir de outras características do solo que sejam de mais fácil determinação.

Uma vez que a condutividade hidráulica e a porosidade drenável do solo provêm do mesmo espaço poroso, é de se esperar que, dentre essas variáveis, haja uma correlação, pois ambas são relatadas para uma mesma escala de comprimento interno da geometria dos poros do solo (Mesquita, 2001). Tal consideração fez com que alguns pesquisadores, como van Beers (1965), Chossat & Saignac apud Beltran (1986), Otto (1988) e Poulsen et al. (1999a,b), propusessem equações empíricas para estimativa da porosidade drenável em função da condutividade hidráulica do solo saturado.

Neste contexto se objetivou, com o presente trabalho, testar e avaliar alguns modelos matemáticos existentes na literatura para estimativa da porosidade drenável em função da condutividade hidráulica do solo saturado.

MATERIAL E MÉTODOS

A área em que os trabalhos experimentais foram desenvolvidos compreende a sub-bacia do Ribeirão Marcela, situada na margem direita do Rio Jaguará, que deságua diretamente no reservatório da UHE de Camargos/CEMIG, município de Nazareno, MG, entre as coordenadas UTM X = (550169 a 552810 m) e Y = (7650163 a 7650989 m) e as altitudes 910 a 1060 m; a área experimental está inserida na unidade geomorfológica Planalto dos Campos das Vertentes, bacia hidrográfica Alto Rio Grande; o clima, segundo classificação de Köppen, é do tipo Cwa (temperado com verões quentes e úmidos e invernos secos e frios); o tipo de vegetação dominante é o cerrado tropical subcaducifólio.

A sub-bacia do Ribeirão Marcela é representativa dos ambientes associados ao Latossolo, na região Alto Rio Grande, segundo Giarola et al. (1997). As unidades pedológicas presentes na sub-bacia hidrográfica podem ser visualizadas na Figura 1. Predomina, na sub-bacia, o Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd), ocupando cerca de 65% da área. Esta unidade pedológica ocorre tanto em locais de relevo suave ondulado nos topos e sopés das elevações, como nas encostas de relevos ondulados, locais de sua maior expressão. O Latossolo Vermelho distrófico típico (LEd), ocupa cerca de 14% da área da sub-bacia hidrográfica, aparecendo mesclado dentro do LVAd. Os Cambissolos (C) ocupam menos de 5% e os Solos Hidromórficos (Hi), compreendendo as várzeas, ocupam aproximadamente 17% da área da sub-bacia (Gomes, 2005).

A seleção dos pontos para a realização dos testes de condutividade hidráulica e para a coleta de amostras indeformadas de solo, procedeu-se da seguinte forma: inicialmente obedeceu-se a um grid quadrado espaçado de 240 x 240 m, cobrindo toda a sub-bacia, totalizando 80 pontos de coleta; em uma segunda etapa, com a finalidade de se fazer um detalhamento maior, com os pontos amostrais mais próximos entre si, fez-se um novo grid, espaçado de 60 x 60 m em quatro células cujos vértices coincidiram com pontos amostrais do grid anterior, totalizando mais 79 pontos de

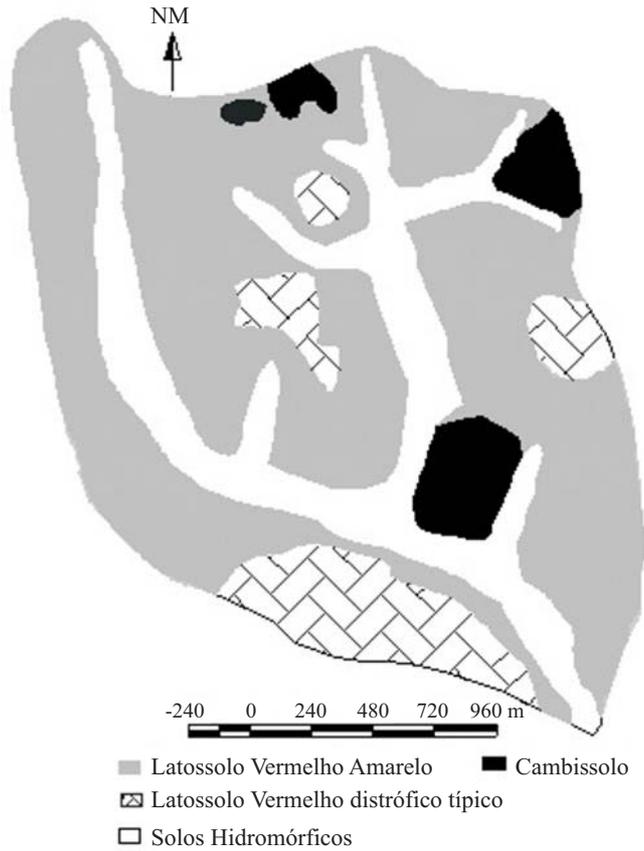


Figura 1. Unidades pedológicas presentes na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela (Fonte: Giarola et al., 1997)

coleta; outros 6 pontos foram amostrados aleatoriamente com a finalidade de se detalhar uma região sob vegetação de cerrado mais densa; ao todo, foram amostrados 165 pontos, como pode ser visto na Figura 2; trabalhou-se com a camada superficial (0-15 cm) do solo.

A condutividade hidráulica do solo saturado foi determinada in situ, utilizando-se o permeâmetro de Guelph (Reynolds & Elrick, 1985); já a porosidade drenável foi obtida em laboratório, através de amostras de solo com estrutura indeformada as quais, depois de saturadas, foram pesadas, colocadas em funis de placa porosa e submetidas às tensões de 6 e 10 kPa, até atingirem a condição de equilíbrio (Oliveira, 1968); atingida esta condição, as amostras foram retiradas dos funis de placa porosa e pesadas novamente.

Devido ao fato da capacidade de campo não ser um valor precisamente definido no solo (Queiroz, 1995) e se considerando que alguns autores sugerem a aplicação de uma tensão de 6 kPa e outros, a aplicação de uma tensão de 10 kPa (Otto, 1988) como a tensão na capacidade de campo, foram obtidos, para cada ponto, dois valores de porosidade drenável: um na tensão de 6 kPa e outro na tensão de 10 kPa.

Com o volume das amostras e os pesos correspondentes à saturação e às sucções de 6 e 10 kPa, calculou-se a porosidade drenável conforme, Queiroz (1995):

$$\mu = \theta_s - \theta_{cc} \tag{1}$$

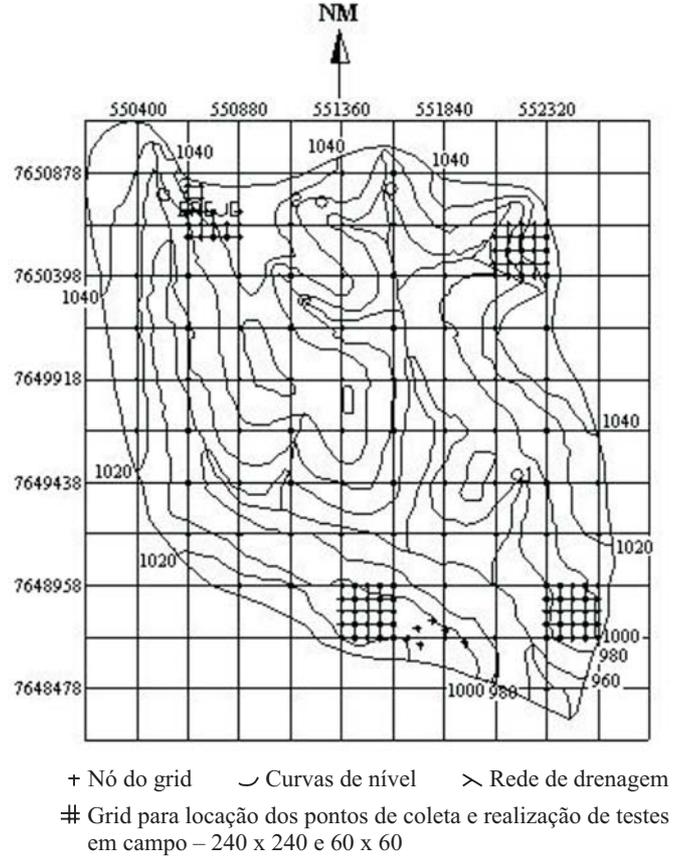


Figura 2. Esquema de amostragem sistemática utilizada na sub-bacia do Ribeirão Marcela para coleta de amostras de solo e realização de testes em campo, com detalhe altimétrico (Fonte: Gomes, 2005)

em que μ é a porosidade drenável (cm cm^{-3}); θ_s é a umidade, base volume, na saturação (cm cm^{-3}); θ_{cc} é a umidade, base volume, na capacidade de campo (cm cm^{-3}).

Alguns pesquisadores propuseram equações empíricas para estimativa da porosidade drenável em função da condutividade hidráulica do solo saturado como, por exemplo, a equação proposta por van Beers (1965):

$$\mu = Ko^{1/2} \tag{Beers} \tag{2}$$

em que μ é a porosidade drenável em % e Ko é a condutividade hidráulica do solo saturado em cm d^{-1} .

Chossat & Saugnac apud Beltran (1986), definiram a relação entre m e Ko , em solos da França, encontrando as seguintes relações:

$$\mu = 0,025 + 0,006 Ko \tag{Chossat e Saugnac 1} \tag{3}$$

$$\mu = 0,0153 + 0,017 Ko^{1/2} \tag{Chossat e Saugnac 2} \tag{4}$$

$$\mu = 0,033 Ko^{0,289} \tag{Chossat e Saugnac 3} \tag{5}$$

em que μ é a porosidade drenável em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ e Ko é a condutividade hidráulica do solo saturado em m d^{-1} .

Otto (1988) propôs equações para estimativa da porosidade drenável em função da condutividade hidráulica do solo:

$$\mu = 6,37238 + 0,457879 Ko^{1/2} \quad (\text{Otto 1}) \quad (6)$$

$$\mu = 2,53619 Ko^{0,309505} \quad (\text{Otto 2}) \quad (7)$$

em que μ é a porosidade drenável em % e Ko é a condutividade hidráulica do solo saturado em cm d^{-1} .

Poulsen et al. (1999a, 1999b) também desenvolveram modelos para estimativa da porosidade drenável em função da condutividade hidráulica do solo:

$$\mu = 0,066137 * Ko^{1/3,15} * \theta_s^{2/3} \quad (\text{Poulsen A}) \quad (8)$$

$$\mu = 10^{[(\log Ko - 4,3)/2,8]} \quad (\text{Poulsen B}) \quad (9)$$

em que μ é a porosidade drenável ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), Ko é a condutividade hidráulica do solo saturado (cm d^{-1}), e θ_s é a umidade de saturação ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

Utilizando-se as equações de 2 a 9, estimou-se a porosidade drenável a partir da condutividade hidráulica do solo saturado, obtida experimentalmente. A avaliação da precisão das estimativas para cada equação, foi feita a partir da determinação do erro padrão de estimativa (S_{yx}), que mede a dispersão entre os valores observados e estimados pela equação, mediante as seguintes fórmulas:

$$S_{yx} = \frac{\sum[(\mu_{\text{obs}} - \mu_{\text{calc}})^2]}{n - (k - 1)} \quad (10)$$

$$S_{yx} \% = 100 * S_{yx} / \gamma \quad (11)$$

em que: μ_{calc} = porosidade drenável estimada; μ_{obs} = porosidade drenável observada; n = número de observações; k = número de variáveis independentes da equação; γ = média aritmética da variável dependente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de condutividade hidráulica do solo saturado (Ko) e de porosidade drenável a 10 kPa para os 165 pontos da sub-bacia do Ribeirão Marcela avaliados neste trabalho, podem ser visualizados na Figura 3. Há predominância do valor de $0,55 \text{ m d}^{-1}$ no sentido sudoeste-centro e do valor de $0,7 \text{ m d}^{-1}$ ao sul. Segundo Bernardo (2002), solos que apresentam valores de Ko maiores que $0,72 \text{ m d}^{-1}$ são solos de Ko muito alta; valores entre $0,36$ e $0,72 \text{ m d}^{-1}$, solos de alta Ko ; valores entre $0,12$ e $0,36 \text{ m d}^{-1}$, média Ko ; valores abaixo de $0,12 \text{ m d}^{-1}$, baixa Ko . Quando comparados os valores de Ko encontrados com as classes de Ko propostas por este autor, verifica-se que os solos da sub-bacia do Ribeirão Marcela apresentam alta Ko , o que já era de se esperar, em função das classes de solo presentes.

Confrontando-se as Figuras 1 e 3, constata-se que os maiores valores de Ko se encontram na gleba de Latossolo Vermelho distrófico típico; este fato pode estar relacionado a fatores pedogenéticos e de formação desta classe de solo, uma vez que, conforme constatado por Giarola et al. (1997), o material de origem deste Latossolo possui uma orientação verticalizada, favorecendo uma paleodrenagem mais inten-

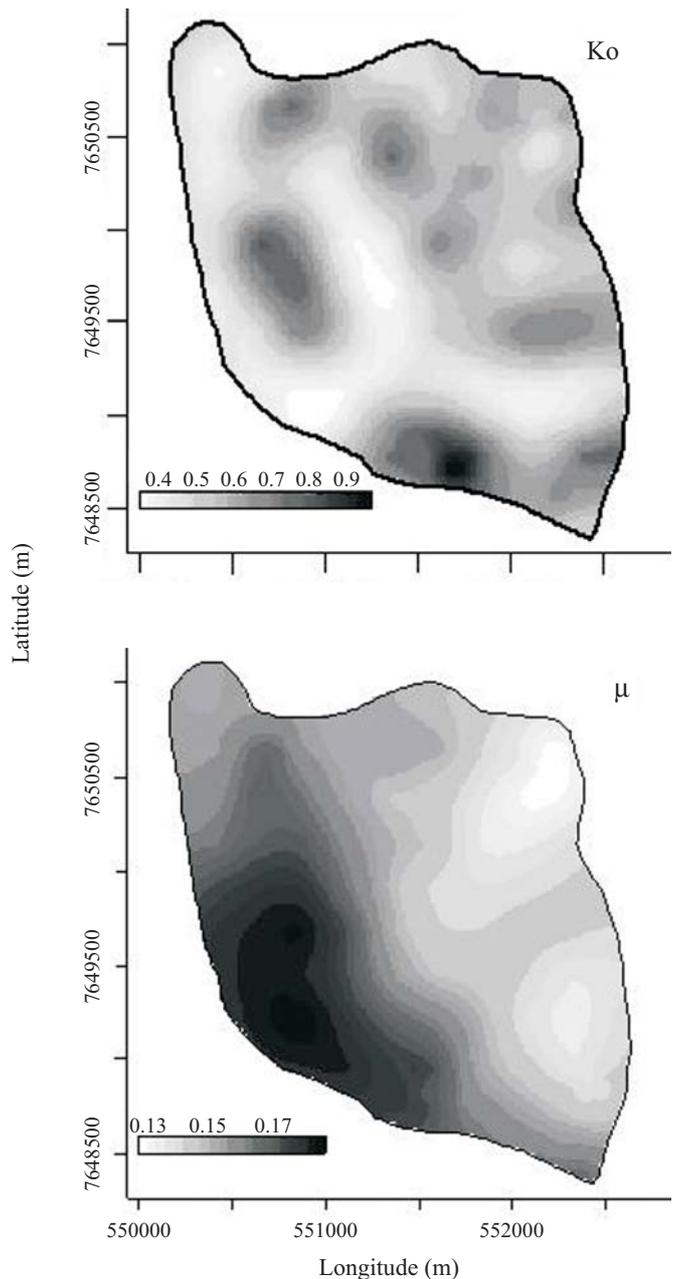


Figura 3. Distribuição espacial da condutividade hidráulica do solo saturado (Ko) e da porosidade drenável (μ) na sub-bacia do Ribeirão Marcela

sificada, caracterizando um ambiente mais seco, o que favorece a formação hematítica e, por conseqüência, melhor qualidade estrutural.

A estrutura deste solo é constituída basicamente por agregados estáveis, formando uma estrutura do tipo granular, o que facilita o processo de infiltração de água (Gomes, 2005).

Com relação à porosidade drenável (μ) a 10 kPa, esta apresenta comportamento bem característico, crescendo no sentido leste-oeste da sub-bacia. Maiores informações a respeito das características físico-hídricas desta sub-bacia podem ser encontradas em Gomes (2005).

Os valores de m estimados através dos modelos versus os valores de m observados em laboratório (Figura 4) foram plotados para se verificar a capacidade de estimativa da porosidade

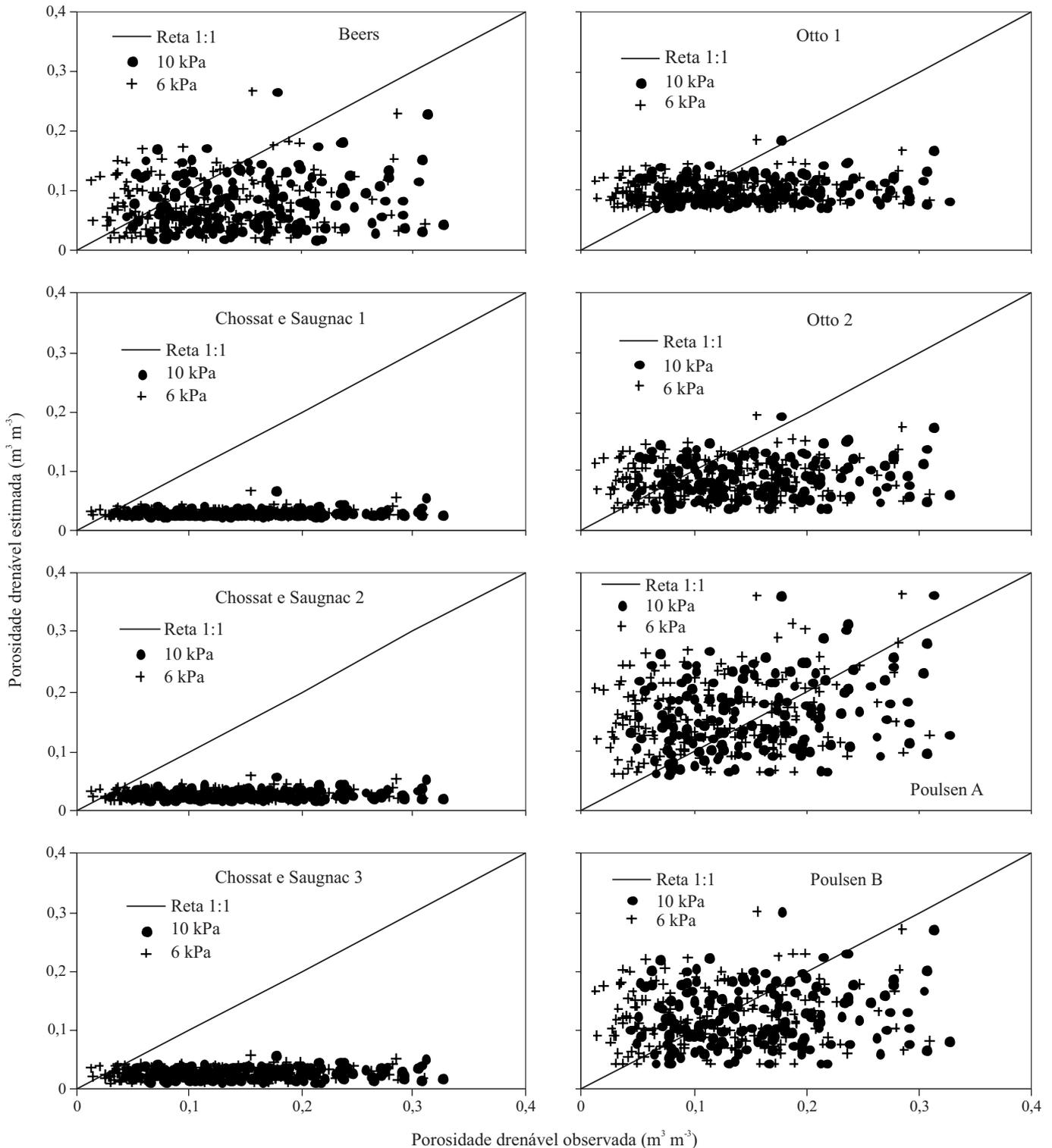


Figura 4. Porosidade drenável estimada pelos modelos propostos versus porosidade drenável observada

drenável pelos modelos apresentados neste trabalho e, como critério de avaliação da capacidade de estimativa desses modelos, adotou-se a linha 1:1, que indica o quanto os valores estimados estão próximos dos observados em laboratório.

As estimativas obtidas pelas equações propostas por Poulsen et al. (1999a,b) apresentaram resultados mais satisfatórios dentre os modelos analisados, devido ao fato dos dados se distribuírem melhor em torno da linha de 1:1.

É possível observar, também, significativa variabilidade entre as estimativas obtidas mostrando que os diferentes modelos foram desenvolvidos considerando-se critérios e condições diferentes entre si.

O erro padrão de estimativa, em porcentagem, para cada modelo, é apresentado na Tabela 1; verifica-se que, quanto menor o valor do erro padrão de estimativa melhor é o ajuste do modelo empírico às condições reais;

Tabela 1. Erro padrão de estimativa (S_{yx})

Porosidade drenável	S_{yx} (%)							
	Beers	Chossat e Saugnac 1	Chossat e Saugnac 2	Chossat e Saugnac 3	Otto 1	Otto 2	Poulsen A	Poulsen B
a 6 kPa	111,77	379,49	399,75	418,21	71,66	90,08	55,92	64,57
a 10 kPa	135,42	469,66	493,96	516,11	86,28	109,93	49,26	68,04

portanto, o modelo empírico proposto por van Beers (1965) não foi eficiente para estimativa da porosidade drenável em função da condutividade hidráulica do solo saturado.

Os três modelos empíricos propostos por Chossat e Saugnac variaram muito pouco entre si porém os valores estimados de porosidade drenável se apresentaram bem diferentes (valores bem menores) dos valores observados, não se prestando como equações adequadas para a estimativa da porosidade drenável em função da condutividade hidráulica para a referida condição. Essas equações foram as que pior se ajustaram, haja vista que apresentaram os maiores valores para o erro padrão de estimativa e uma vez que essas equações foram desenvolvidas a partir de estudos realizados com solos da França, era de se prever que não se adequassem a este estudo, pois as condições de clima, vegetação etc., da França, que influenciam na formação do solo e, conseqüentemente, em suas características, são totalmente diferentes das encontradas aqui no Brasil.

As equações de Otto (1) e Otto (2) também não se apresentaram adequadas para estimativa da porosidade drenável em função da condutividade hidráulica do solo saturado. Conclui-se, portanto, que para ambas as condições (porosidade drenável a 6 kPa e porosidade drenável a 10 kPa), a equação de Poulsen et al. (1999a) foi a que melhor se ajustou, apresentando os menores valores de erro padrão de estimativa, cuja provável justificativa é que, para o desenvolvimento de seu modelo empírico, Poulsen et al. (1999a) levaram em consideração outros parâmetros além da condutividade hidráulica do solo saturado, tais como a densidade da água, viscosidade da água, aceleração da gravidade, diâmetro equivalente do poro e a tortuosidade do sistema poroso (parâmetro de conexão dos poros); além disso, o modelo foi desenvolvido a partir de dados obtidos de solos com diferenças significativas em suas texturas; logo, este modelo leva em conta outras características físicas do solo e da água, sendo mais consistente que os demais modelos estudados neste trabalho.

Percebe-se, portanto, que alguns pesquisadores desenvolveram modelos matemáticos para prever a porosidade drenável em função da condutividade hidráulica do solo saturado, e não obtiveram muito êxito em tal método, talvez pelo fato de que a condutividade hidráulica saturada possui alta variabilidade espacial (Galdino, 1988). A grande variabilidade espacial da condutividade hidráulica saturada do solo dificulta o uso de equações empíricas na estimativa da porosidade drenável sendo, portanto, imprescindível e indispensável a sua medida direta no campo ou em laboratório.

Por outro lado, os modelos matemáticos avaliados neste

trabalho foram testados e desenvolvidos para condições particulares, o que limita a sua aplicação e extrapolação a outras condições de estudo.

Se a determinação da porosidade drenável por métodos diretos realmente se apresentar inviável ou indisponível, em último caso a estimativa a partir da equação proposta por Poulsen et al. (1999a) se apresenta como alternativa coerente.

CONCLUSÕES

1. A equação proposta por Poulsen et al. (1999a) proporcionou as melhores estimativas da porosidade drenável.
2. Os demais modelos estudados não estimaram satisfatoriamente a porosidade drenável do solo.

LITERATURA CITADA

- Beltran, J. M. Drenaje agrícola. Madri: Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario, 1986. 239p.
- Bernardo, S. Manual de irrigação. 6.ed. Viçosa: UFV, 2002. 656p.
- Galdino, S. Estimativa da macroporosidade em função de algumas características de solo de várzea. Viçosa: UFV, 1988. 61p. Dissertação Mestrado
- Giarola, M. F. B.; Curi, N.; Siqueira, J. O.; Chagas, C. S.; Ferreira, M. M. Solos da região sob influência do reservatório da hidrelétrica de Itutinga/Camargos (MG): Perspectiva ambiental. Convênio CEMIG/UFLA/FAEPE. Lavras: UFLA, 1997. 101p.
- Gomes, N. M. Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo da sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela na Região do Alto Rio Grande, MG. Lavras: UFLA, 2005. 124p. Dissertação Mestrado
- Mesquita, M. da G. B. de F. Caracterização estatística da condutividade hidráulica saturada do solo. Piracicaba: ESALQ/USP, 2001. 110p. Tese Doutorado
- Oliveira, L. B. Determinação da macro e microporosidade pela mesa de tensão em amostras de solo com estrutura indeformada. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.3, p.197-200, 1968.
- Otto, S. R. L. Estimativa da porosidade drenável em função das propriedades de solo orgânico. Viçosa: UFV, 1988. 89p. Dissertação Mestrado
- Pizarro, F. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. Madri: Editora Agrícola Espanhola, 1978. 522p.
- Poulsen, T. G.; Moldrup, P.; Yamaguchi, T.; Schjonning, P.; Hansen, J. A. Predicting soil-water and soil-air transport properties and their effects on soil vapor extraction efficiency. Ground Water Monit. Remediation, v.19, p.61-69, 1999a.
- Poulsen, T. G.; Moldrup, P.; Yamaguchi, T.; Jacobsen, O. H. Predicting saturated and unsaturated hydraulic conductivity in undisturbed soils from soil water characteristics. Soil Science, v.164, n.2, p.877-887, 1999b.

- Queiroz, J. E. Parâmetros hidrodinâmicos de um solo de várzea para fins de drenagem subterrânea. Piracicaba: ESALQ/USP, 1995. 167p. Tese Doutorado
- Queiroz, J. E. Um novo método de cálculo da porosidade drenável. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.1, p.117-119, 1997.
- Reynolds, W. D.; Elrick, D. E. In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the 'a' parameter using the Guelph permeameter. *Soil Science*, Baltimore, v.140, n.4, p.292-302, 1985.
- van Beers, W. F. J. Some homographs for the calculation of drain spacings. Wageningen: International Institute for Land Reclamation and Improvement, 1965. 48p.