



Espacialização da permeabilidade do solo ao ar⁽¹⁾

Alexsandro dos Santos Brito⁽²⁾; Paulo Leonel Libardi⁽³⁾; Jaedson Cláudio Anunciato Mota⁽⁴⁾; Sergio Oliveira Moraes⁽⁵⁾

⁽¹⁾ Trabalho executado com recursos do CNPq (Edital Universal 477215/2007-6)

⁽²⁾ Professor Efetivo do Instituto Federal Baiano; Guanambi/Bahia; alexandro.brito@gunambi.ifbaiano.edu.br;

⁽³⁾ Professor Titular da Universidade de São Paulo; ⁽⁴⁾ Professor Adjunto da Universidade Federal do Ceará; ⁽⁵⁾ Professor Doutor da Universidade de São Paulo.

RESUMO: Os atributos fortemente correlacionados com o espaço poroso do solo tornam-se muito importantes, pois têm ação direta no desenvolvimento vegetal. Como os atributos do solo relacionados ao transporte de ar são altamente variáveis no espaço, o objetivo deste trabalho foi estudar a variabilidade espacial da permeabilidade do solo ao ar. Para tanto, foi instalado um experimento no campo, num Latossolo Vermelho Amarelo – textura média, constituído por 60 pontos amostrais, constituindo uma malha regular de 5 x 5 m. A permeabilidade do solo ao ar (k_a) foi determinada pelo método da pressão decrescente, realizada em laboratório, utilizando amostras de solo com estrutura indeformada, equilibradas nas tensões de 6 e 10 kPa. Os valores mais elevados de permeabilidade intrínseca do solo ao ar foram encontrados nas porções da área experimental com menores cotas altimétricas, o que indica uma influência da morfologia do terreno na estrutura do solo, principalmente porque nessas porções há uma maior quantidade de argila. Os mapas de predição das permeabilidades do solo ao ar foram semelhantes quanto à localização dos maiores e menores valores, mas houve um aumento das porções de área com valores mais elevados de $k_a(\phi_m=10 \text{ kPa})$ em comparação ao de $k_a(\phi_m=6 \text{ kPa})$, devido ao esvaziamento de poros com raios menores, que aumenta a conectividade e, conseqüentemente, o fluxo de ar.

Termos de indexação: Porosidade; aeração; geoestatística.

INTRODUÇÃO

A condutividade do solo, seja medida com a água ou com o ar, é influenciada por propriedades do solo, ligadas ao espaço poroso, e do fluido. A distribuição de tamanho, a tortuosidade e a conectividade dos poros são as características da geometria do espaço poroso que mais influenciam no transporte de fluidos no solo (Iversen et al., 2001; Tuli et al., 2005; Chief et al., 2006). Já a propriedade relevante ao transporte, referente ao fluido, é a viscosidade. A permeabilidade intrínseca é uma propriedade inerente ao solo e reflete a influência conjunta das propriedades relacionadas ao espaço

poroso. A permeabilidade intrínseca do solo ao ar pode ser definida como a habilidade do solo em transmitir ar através de poros interconectados contendo ar (Chief et al., 2006). Em muitos trabalhos, essa propriedade é denominada, por comodidade, simplesmente por permeabilidade, simplificação que será adotada também nesse trabalho.

A importância da quantificação da permeabilidade do solo ao ar deve-se, por exemplo, à necessidade de se caracterizar o espaço poroso e de se identificar mudanças na estrutura do solo, ocasionadas pelas práticas de manejo (Cavaliere et al., 2009); estabelecer correlações com outras propriedades do solo que são de difícil determinação, como é o caso da condutividade hidráulica e na extração de vapor de contaminantes presentes nesse meio poroso.

As práticas de preparo do solo comumente utilizadas pelos produtores tendem a proporcionar uma maior uniformidade quanto aos aspectos físicos do solo. Por exemplo, o conteúdo de água na camada de 0-0,15 m é mais variável no sistema de plantio direto, enquanto que em sistema de plantio convencional há maior dependência espacial (Zanette et al., 2007). A maior homogeneidade da área com sistema de plantio convencional se dá pelo fato de a aração e a gradagem promoverem uma maior uniformização (Schaffrath et al., 2008).

Pequenas modificações na distribuição do tamanho dos poros podem interferir muito na permeabilidade do solo ao ar. Por isso, entender e descrever a tortuosidade e conectividade dos poros para os fluidos do solo (água e ar) têm sido um dos grandes objetivos da Física do solo, sendo pré-requisito para descrever e prever transporte de fluidos (soluções e gases) por difusão e dispersão-convecção (Moldrup et al., 2001). Nesse aspecto, a permeabilidade intrínseca do solo ao ar pode ser usada para determinar as características dos poros do solo (Iversen et al., 2001).

Em solos considerados homogêneos experimentalmente, pode ocorrer de algum atributo ser variável no espaço e estar determinando efeitos diversos que não são efeitos de tratamento, sendo declarados como efeitos dos fatores não controlados.



Partindo da hipótese de que processos físicos, químicos, biológicos e mecânicos, relacionado com o relevo, podem alterar a distribuição do tamanho de poros, o objetivo deste trabalho foi estudar a distribuição espacial da permeabilidade intrínseca do solo ao ar.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em uma área experimental da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, localizada no município de Piracicaba, Estado de São Paulo, Brasil. As coordenadas geográficas da área são 22°42'43”S, 47°37'10”W e 591 m de altitude. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, textura média a arenosa (Figura 1).

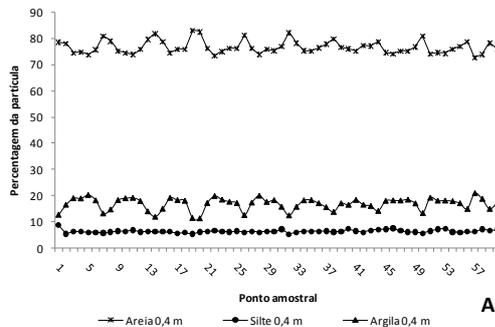


Figura 1 – Percentagem de areia, silte e argila na profundidade de 0,4 m, nos 60 pontos amostrais.

Tratamentos e amostragens

Para o estudo do movimento do ar no solo foi utilizada a metodologia desenvolvida por Kirkham (1946), utilizando amostra de solo com estrutura indeformada para a medida da permeabilidade intrínseca do solo ao ar.

As amostras foram coletadas com um extrator tipo Uhland e anéis volumétricos com as seguintes dimensões médias: 0,047 m de diâmetro e 0,05 m de altura. No laboratório, as amostras foram convenientemente preparadas, retirando-se o excesso de solo, de forma ao volume de solo ser igual ao volume do anel volumétrico, e colando-se na sua base um recorte, com diâmetro igual ao do anel volumétrico, de papel mata-borrão, para evitar perda de solo e melhorar o contato da amostra com a placa porosa, durante o processo de estabilização nas tensões em funil de Haines. Após esse preparo, as amostras foram saturadas, utilizando-se um recipiente de mesma altura dos anéis, no qual foi adicionada água deionizada, elevando-se o nível de água gradativamente, até atingir 2/3 da altura do anel, com o objetivo de expulsar todo o ar presente

nos poros. As amostras foram deixadas em processo de saturação durante 24 horas.

As amostras foram, primeiramente, equilibradas nas tensões de 6 e 10 kPa em funis de Haines. Após o equilíbrio em cada tensão, a amostra foi pesada em balança de duas casas decimais, o mata-borrão foi removido, com auxílio de um estilete, e foi realizada uma leve escarificação da extremidade da amostra de solo que ficou em contato com a placa porosa. Então, a amostra foi acoplada ao permeâmetro para determinação da permeabilidade do solo ao ar.

O modelo de determinação da permeabilidade do solo ao ar, pelo método da pressão decrescente desenvolvido por Kirkham (1946), se baseou no modelo de Darcy. Dessa forma, exige-se que o regime de fluxo seja laminar e para o caso do fluxo de gás, exige-se que o processo de fluxo seja isotérmico. Dessa forma, a diminuição da pressão interna (pressão manométrica) no cilindro de ar é dada pela seguinte equação (1):

$$\ln P_{a1} - \ln P_{a2} = \frac{k_a AP_{atm}}{L\eta V} (t_2 - t_1), \quad (1)$$

na qual, P_{a1} e P_{a2} são as pressões manométricas (acima da pressão atmosférica) nos tempos t_1 e t_2 , respectivamente; k_a é a permeabilidade do solo ao ar; A é a área da seção da amostra de solo indeformada; P_{atm} é a pressão atmosférica local; L a altura da amostra de solo; η é a viscosidade do ar e V é o volume do cilindro de ar.

Análise estatística

A análise dos dados consistiu de uma análise exploratória e de uma análise espacial, utilizando ferramentas geoestatísticas. A análise exploratória baseou-se no teste de distribuição de probabilidade dos dados (Shapiro-Wilk); construção de gráficos quantis-quantis (“qqplot”); estudo da relação dos dados em relação às coordenadas vertical e horizontal da área experimental e gráficos de caixa, com o objetivo de verificar a dispersão e a presença de valores discrepantes (outliers).

A análise espacial foi feita, inicialmente, utilizando a função “points” do pacote GeoR, para verificar a disposição dos dados nos seus locais de medida e o semivariograma experimental, como também a modelagem de parâmetros do modelo e correlação espacial. O editor de código R utilizado foi o Tinn-R.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O relevo do terreno é considerado plano, mas com a presença de porções mais altas e com uma diferença de 0,76 m entre a maior e a menor cotas altimétricas (Figura 2).

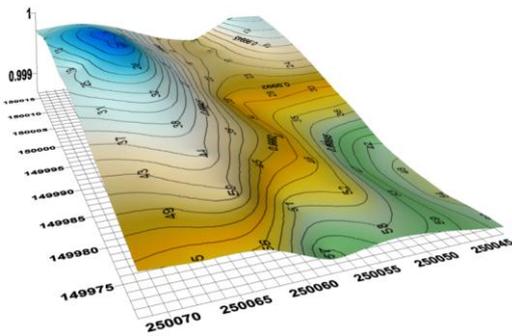


Figura 2 – Mapa planialtimétrico da área experimental, representado por cotas altimétricas relativas à maior cota

Os pontos amostrais localizados nas maiores cotas altimétricas do terreno apresentaram, sistematicamente, maiores quantidades de areia nas profundidades de 0,2 e 0,4 m (**Figura 1**), enquanto aqueles localizados em cotas altimétricas menores apresentam maiores quantidades de argila. Para as profundidades de 0,6 e 0,8 m, observou-se uma pequena variação das frações granulométricas.

A análise granulométrica foi preponderante, possibilitando uma interpretação mais clara dos resultados. O ponto 28, por exemplo, localizado em uma das cotas mais baixas e ao entorno de porções mais altas da área experimental, apresentou um teor médio de argila no perfil de solo de 199 g kg^{-1} , enquanto os pontos 11 e 19, localizados em cota média e alta, respectivamente, apresentaram 190 e 144 g kg^{-1} .

O raio médio do poro mais frequente para todos os pontos foi de $37,97 \pm 3,73 \mu\text{m}$. Os menores raios dos poros mais frequentes foram representados pelos pontos 2, 4 e 5 e os maiores pelos pontos 14, 21 e 32. Relacionando esses resultados com o relevo, observou-se que os pontos amostrais com menores e maiores raios localizam-se em cotas altimétricas menores e maiores, respectivamente. Entretanto, não existe uma tendência bem definida, mesmo os locais mais baixos da área experimental possuindo uma quantidade de argila maior, o que poderia levar a um acúmulo dessas partículas nesses locais, principalmente argila dispersa, podendo ocasionar entupimento dos poros.

A proporção média desses poros foi de 23,32% de macroporos, 28,39% de mesoporos e 48,29% de microporos (**Figura 3**).

Observa-se que há uma tendência dos pontos localizados em cotas altimétricas mais elevadas apresentarem maior percentagem de macroporos, em função da maior conteúdo médio de areia.

O modelo espacial que melhor ajustou as permeabilidades (**Figura 4**) foi o de Matérn, com parâmetro $\kappa = 1,5$ para $k_a(\phi_m = -6 \text{ kPa})$ e $0,5$ para $k_a(\phi_m = -10 \text{ kPa})$, além de utilizar o índice de

organização da macroporosidade na profundidade de 0,8 m como covariável, nos dois modelos.

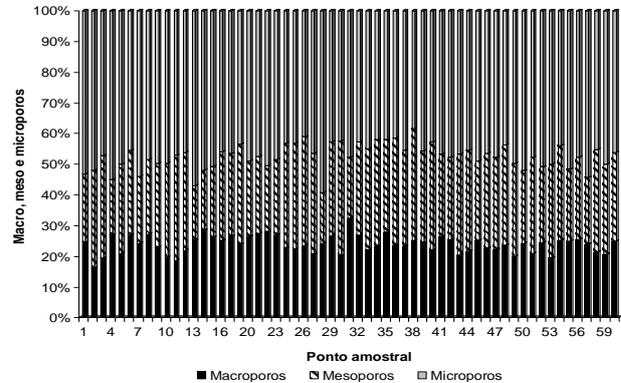


Figura 3 – Distribuição dos macro, meso e microporos do solo para cada ponto amostral na profundidade de 0,8 m.

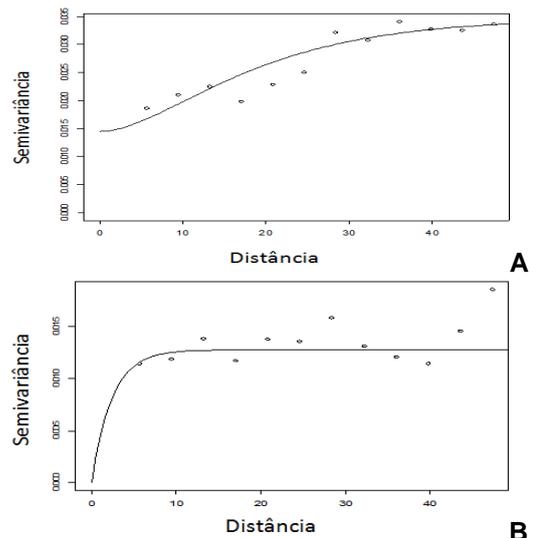


Figura 4 – Semivariogramas experimentais e ajustados da $k_a(\phi_m = -6 \text{ kPa})$ e $k_a(\phi_m = -10 \text{ kPa})$, A e B, respectivamente.

Os parâmetros de ajuste da correlação espacial para $k_a(\phi_m = -6 \text{ kPa})$ foram os seguintes: o efeito pepita (τ^2) igual a 0,0145; patamar ($\tau^2 + \sigma^2$) igual a 0,0345 e o $\phi = 10,00$, sendo que para o modelo de Matérn com $\kappa = 1,5$; o alcance é igual a $4,75 \phi$, ou seja, 47,5 metros. Para $k_a(\phi_m = -10 \text{ kPa})$, o $\tau^2 = 0$, $\tau^2 + \sigma^2 = 0,0128$ e $\phi = 2,38$. Como para $k_a(\phi = -10 \text{ kPa})$ o parâmetro $\kappa = 0,5$; o alcance é igual a 3ϕ , ou seja, 7,14 metros. O IDE para $k_a(\phi_m = -6 \text{ kPa})$ e $k_a(\phi_m = -10 \text{ kPa})$ foram iguais a 0,58 e 1,00, respectivamente, ambos considerados de alta correlação espacial.

Avaliações da variabilidade espacial da permeabilidade do solo ao ar, feitas em transeções, apresentaram coeficientes de variação oscilando de



16,8 a 20,5% e alcances da dependência espacial oscilando de 12 a 24 metros (Poulsen et al., 2001; Resurreccion et al., 2007). Nesses trabalhos, a permeabilidade do solo ao ar foi medida em amostras equilibradas no potencial mátrico de -10 kPa, mostrando pequenos alcances, como também foi observado no presente trabalho. Entretanto, com as amostras de solo equilibradas no potencial mátrico de -6 kPa, a dependência espacial foi mais elevada.

Com o modelo de correlação espacial ajustado, passou-se à etapa de construção dos mapas de predição (**Figura 5**), os quais foram pelo método de interpolação por krigagem ordinária. Para esses mapas também foi criada uma malha de predição com pontos a cada 0,2 m, totalizando 48.576 pontos.

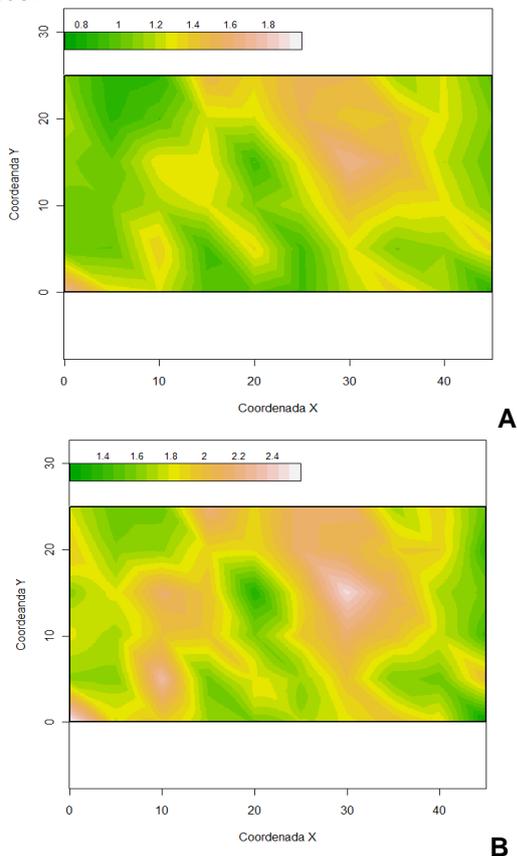


Figura 5 – Mapa de predição (krigagem) da permeabilidade do solo ao ar para amostras de solo com estrutura indeformada equilibradas nas tensões de 6 (A) e 10 kPa (B).

Os mapas de predição apresentam-se bastante semelhantes, sendo que para $k_a(\phi_m=-10 \text{ kPa})$ houve uma expansão dos altos valores de permeabilidade em comparação à $k_a(\phi_m=-6 \text{ kPa})$. Com a aplicação de uma tensão mais alta, provoca-se o esvaziamento de poros com raios menores, o que aumenta a conectividade e, conseqüentemente, o

fluxo de ar.

Analisando os mapas de predição, verifica-se que os valores mais elevados se localizam na porção central e nas proximidades dos pontos 36, 48, 54 e 60 que correspondem às porções mais baixas da área experimental.

CONCLUSÕES

Os mapas de predição das permeabilidades do solo ao ar foram semelhantes quanto à localização dos maiores e menores valores, mas houve um aumento das porções de área com valores mais elevados da permeabilidade do solo ao ar na tensão de 10 kPa, em comparação aos da tensão de 6 kPa.

REFERÊNCIAS

- CAVALIERI, K. M. V., A. P. DA SILVA, et al. "Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil." *Soil and Tillage Research*, v.103:158-164, 2009.
- CHIEF, K.; FERRÉ, T.P.A.; NIJSSEN, B. Field testing of a soil corer air permeameter (SCAP) in desert soils. *Vadose Zone Journal*, v. 5:1257-1263, 2006.
- IVERSEN, B.V.; MOLDRUP, P.; SCHJONNING, P.; LOLL, P. Air and water permeability in differently textured soils at two measurement scales. *Soil Science*, v. 166:643-659, 2001.
- KIRKHAM, D. Field method for determination of air permeability of soil in its undisturbed state. *Soil Science Society of America Proceedings*, v. 11:93 – 99, 1946.
- MOLDRUP, P.; OLESEN, T.; KOMATSU, T.; SCHJONNING, P.; ROLSTON, D.E. Tortuosity, Diffusivity, and Permeability in the Soil Liquid and Gaseous Phases. *Soil Science Society of America Journal*, v. 65:613-623, 2001.
- POULSEN, T.G.; IVERSEN, B.V.; YAMAGUCHI, T.; MOLDRUP, P.; SCHJONNING, P. Spatial and temporal dynamics of air permeability in a constructed field. *Soil Science*, Baltimore, v. 166:153-162, 2001.
- RESURRECCION, A.C.; KAWAMOTO, K.; KOMATSU, T.; MOLDRUP, P.; OZAKI, N.; ROLSTON, D.E. Gas transport parameters along field transects of a volcanic ash soil. *Soil Science*, v. 172:3-16, 2007.
- SCHAFFRATH, V.R.; TORMENA, C.A.; FIDALSHI, J.; GONÇALVES, A.C.A. Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32:1369-1377, 2008.
- TULI, A.; HOPMANS, J.W.; ROLSTON, D.E.; MOLDRUP, P. Comparison of air and water permeability between disturbed and undisturbed soils. *Soil Science Society of American Journal*, v. 69: 1361-1371, 2005.
- ZANETTE, S.V.; SILVESTRE, M.G.; BOAS, M.A.V.; UIRBE-OPAZO, M.A.; QUEIROZ, M.M.F. Spatial analysis of soil moisture with soybean under two management systems. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 11:239-247, 2007.