

Variabilidade espacial da macroporosidade do solo em área irrigada, antes do preparo e após colheita, sob dois sistemas de preparo

José de Deus Viana da Mata^{1*}, Antônio Carlos Andrade Gonçalves¹ e Sidney Rosa Vieira²

¹Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-900, Maringá-Paraná, Brazil.

²Instituto Agronômico de Campinas, C.P. 28, 13001-970, Campinas-São Paulo, Brazil. *Author for correspondence.

RESUMO. No segundo semestre de 1995, no Centro Técnico de Irrigação da UEM, em Maringá (PR), foram estudadas as modificações ocorridas na macroporosidade entre amostragens coletadas antes do preparo do solo e após a colheita da cultura de feijão, em área irrigada por pivô-central. Duas parcelas foram submetidas à aração e à escarificação. Constatou-se tendência de redução dos valores da macroporosidade ao longo do tempo, para a parcela sob aração, associada a um aumento do valor médio da densidade do solo. O contrário ocorreu na parcela sob escarificação, uma vez que esse tratamento deu origem a um aumento de 83% do valor médio da macroporosidade, o que promoveu melhor aeração, melhores condições de desenvolvimento radicular e, sobretudo, melhores condições de infiltração de água no perfil. A estrutura de dependência espacial, inicialmente, igual para as duas parcelas, não foi alterada pelos dois sistemas de preparo, exceto pelo fato de que a escarificação promoveu aumento do efeito pepita em relação ao patamar do semivariograma. A variação em pequenas distâncias promovida por este sistema de preparo está associada a esse fato.

Palavras-chave: geoestatística, irrigação, macroporosidade, preparo do solo, variabilidade espacial.

ABSTRACT. *Spatial variability of soil macroporosity in irrigated area before soil preparation and after crop harvest using conventional tillage and chiseling.* In the second semester of 1995, at the Technical Center of Irrigation of *Universidade Estadual de Maringá*, in Maringá, State of Paraná, Brazil, macroporosity changes between samples collected before soil preparation and after bean crop harvest in two central-pivot-system irrigated plots, one submitted to conventional tillage and the other to chisel plow, were investigated. The conventional tillage reduced the macroporosity value, but increased the soil density average value in the period studied. On the other hand, the chiseling system increased macroporosity average to 83%, which improved aeration, roots development and water infiltration conditions. The initially similar spatial structural dependence of both plots was not modified, except for the fact that chisel plowing reduced the structural nuggets; of the experimental semivariograms, whose range remained the same for both treatments.

Key words: geostatistics, irrigation, macroporosity, soil tillage, spatial variability.

A macroporosidade e a capacidade de água disponível são os mais importantes aspectos da estrutura do solo (Thomasson, 1978). A macroporosidade reflete a habilidade de o solo aceitar e transmitir o excedente das águas de precipitação e irrigação, permitindo, ainda, trocas gasosas entre a rizosfera e a atmosfera. A capacidade de água disponível é a reserva hídrica que suporta o desenvolvimento das plantas durante os períodos onde a transpiração potencial excede a precipitação.

Thomasson (1978) enfatiza que essas duas

propriedades são interdependentes e podem qualificar a estrutura de um solo. Deve-se ressaltar que valores de macroporosidade inferiores a 5% denotam uma condição de pouca movimentação de gases e água no perfil do solo, conferindo, aos solos assim classificados, uma baixa capacidade de redistribuição de água.

Em área irrigada por pivô-central, o acúmulo de água na extremidade é uma limitação, segundo Heermann e Hein (1968). O fluxo saturado de água no solo ocorre predominantemente na porção de

poros denominada macroporosidade e, assim, medidas que possibilitem o aumento desta fração de poros são altamente desejáveis. Nesse sentido, o sistema de preparo escolhido deve levar em conta esta necessidade. É desejável, também, que esse aumento na macroporosidade se mantenha durante o ciclo da cultura visando intensificar a drenagem interna do solo, uma vez que em áreas irrigadas a umidade do solo geralmente é mantida na faixa crítica para a compactação mecânica.

A estatística permite a descrição de uma propriedade, sem considerar a posição espacial dos valores. Como a ação dos sistemas de preparo não é uniforme em toda a área, torna-se importante avaliar também a distribuição espacial dos valores das propriedades do solo. A geoestatística tem como base o semivariograma (Vieira, 1995) e permite a descrição da dependência espacial das propriedades (Webster e Olivier, 1990). Este trabalho teve como objetivo comparar a ação de dois sistemas de preparo, aração e escarificação, sobre a macroporosidade no horizonte superficial de uma terra roxa estruturada, em área irrigada por pivô-central, antes e depois do ciclo da cultura de feijão.

Material e métodos

No Centro de Treinamento em Irrigação, da UEM, em duas parcelas com dimensões de 12 x 40m de uma área com Terra Roxa Estruturada, foram retiradas amostras inalteradas segundo espaçamento de 4 x 4m, na profundidade de 0,20 m. Determinou-se para cada amostra a densidade do solo e o conteúdo de água com base em volume para as tensões de saturação, 0,003 e 0,006 MPa, em mesa de tensão, e a 1,5 MPa, em câmara de Richards. A macroporosidade foi tomada como igual à diferença entre o conteúdo de água na saturação e a 0,006 MPa. A capacidade de água disponível foi tomada como igual ao conteúdo de água entre a macroporosidade e o conteúdo de água retido a 1,5 MPa (Embrapa, 1979).

Seguindo proposta de Thomasson (1978), os valores de macroporosidade e de água disponível foram agrupados em classes com o objetivo de se obter uma classificação estrutural do solo, mediante os tratamentos aplicados. Para a macroporosidade, a classe pobre enquadrava valores menores que 5%, a classe moderada, valores entre 5 e 10%, e a classe boa, valores entre 10 e 15%. Quanto à capacidade de água disponível, valores inferiores a 10% constituíram a classe pobre, entre 10 e 15% a classe moderada e entre 15 e 20%, a classe boa (Thomasson, 1978).

Foi realizada uma amostragem antes do preparo do solo e outra amostragem após a colheita da

cultura de feijão, conduzida em toda a área irrigada pelo pivô, dentro da qual foram demarcadas as parcelas experimentais. Quanto ao preparo primário do solo, uma parcela foi submetida à aração com arado fixo de três discos de 26". Na outra, foi usado um escarificador de 7 hastas espaçadas de 0,25 m. Os dois implementos foram regulados para mobilizar o solo até 0,30 m. Os dados obtidos foram analisados e comparados entre si fazendo-se uso da estatística descritiva e análise exploratória.

O tratamento estatístico dos dados experimentais comumente não leva em conta a possível existência de uma correlação espacial entre as propriedades do solo ou planta. Entretanto, esta correlação espacial pode ser avaliada por meio da geoestatística. O semivariograma experimental descreve a estrutura espacial da propriedade em estudo e pode ser usado para avaliar o efeito de diferentes tratamentos sobre este padrão de dependência. Também permite a estimativa de valores em locais não amostrados, por meio de *krigeagem*.

Assim, a dependência espacial da macroporosidade foi analisada por meio das ferramentas da geoestatística onde o semivariograma assume papel fundamental na estimativa da dependência espacial entre amostras, principalmente quando a prospecção envolve duas direções (Silva, 1988). O semivariograma é estimado por:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2, \quad (01)$$

onde $N(h)$ é o número de pares experimentais de dados separados pelo vetor h e z representa os valores medidos para propriedades do solo ou parâmetros da cultura. O semivariograma normalmente é representado pelo gráfico de $\gamma^*(h)$ versus h . A partir do ajuste de um modelo matemático aos dados experimentais, são definidos os parâmetros do semivariograma, a saber: a) efeito pepita, C_0 , que é o valor de γ quando $h = 0$; b) quando h aumenta, $\gamma(h)$ freqüentemente aumenta até uma distância a , chamada de alcance da dependência espacial, a partir da qual $\gamma(h)$ permanece aproximadamente constante; c) o valor de $\gamma(h)$ neste ponto é chamado de patamar C_2 , e aproxima-se da variância dos dados, se ela existe, e d) C_1 é calculado pela diferença entre C_2 e C_0 . Assim, amostras separadas por distâncias menores do que o alcance são correlacionadas espacialmente, enquanto aquelas separadas por distâncias maiores não o são, uma vez que o semivariograma, sendo igual à variância dos dados, implica variação aleatória. O alcance também define o raio máximo para interpolação por *krigeagem* (Souza, 1992).

O cálculo do semivariograma experimental, $\gamma(h)$ versus h , calculado usando a equação (1), mostra uma série de pontos discretos de $\gamma(h)$ correspondendo a cada valor de h , e para o qual uma função contínua deve ser ajustada. O ajuste de um modelo teórico ao semivariograma experimental é um dos aspectos mais importantes das aplicações da teoria das variáveis regionalizadas e pode ser uma das maiores fontes de ambigüidade e polêmica nessas aplicações. Todos os cálculos de geoestatística dependem do valor do modelo do semivariograma para cada distância especificada (Vieira *et al.*, 1981).

Neste trabalho, todos os semivariogramas foram ajustados pelo modelo esférico, conforme a seguinte equação:

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= C_0 + C_1 [3/2 (h/a) - 1/2 (h/a)^3], & \text{para } 0 < h < a \\ \gamma(h) &= C_0 + C_1, & \text{para } h > a \end{aligned} \quad (2)$$

O modelo esférico é obtido selecionando-se os valores do efeito pepita, C_0 , e do patamar, $C_0 + C_1$, depois passando-se uma reta que intercepte o eixo "y" em C_0 e seja tangente aos primeiros pontos próximos de $h = 0$. Essa reta cruzará o patamar à distância $a' = 2/3 a$. Assim, o alcance será $a = 3 a'/2$. O modelo esférico é linear até aproximadamente $1/3$ do alcance.

Outra ferramenta da geoestatística utilizada foi o escalonamento do semivariograma. Em estudos de variabilidade do solo, normalmente defronta-se com um grande número de semivariogramas experimentais para serem interpretados, na maioria das vezes envolvendo diferentes propriedades do solo, quase sempre avaliadas em diferentes profundidades, unidades de medida e com diferentes magnitudes de variação. Em função disto, torna-se difícil, e ao mesmo tempo necessário, agrupar os dados de maneira a permitir e facilitar conclusões gerais sobre os mesmos (Souza, 1992).

A técnica consiste em reunir vários semivariogramas em uma função única, com base na seguinte equação (Vieira *et al.*, 1991):

$$\gamma^{sc} = \frac{\gamma_i^*(h)}{\alpha_i}, \quad (3)$$

onde i vai de 1 até o número de variáveis medidas, e α é o fator de escalonamento, que neste trabalho foi adotado como o valor da respectiva variância dos dados, o que permitiu que os semivariogramas experimentais se aglutinassem em uma única função. Assim, os valores de $\gamma^{sc}(h)$ calculados para vários semivariogramas devem se ajustar a uma única função, desde que eles sejam escalonados entre si, ou seja, os processos influenciadores dos vários semivariogramas escalonados devem ser semelhantes ou estar de alguma forma associados. Além de facilitar a interpretação de vários semivariogramas, ao reuni-los em um só, a técnica de escalonamento tem sido recomendada também pelo fato de que os valores interpolados por *krigeagem* com base nos modelos de semivariogramas escalonados são idênticos àqueles interpolados com base nos modelos individuais, pois os ponderadores usados na interpolação não mudam em ambos os casos (Souza, 1992).

Resultados e discussão

A Tabela 1 mostra alguns parâmetros estatísticos para a macroporosidade nas condições estudadas. O teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) permite considerar todas as distribuições como normais, em nível de 5%. Verifica-se que a macroporosidade na parcela escarificada antes do preparo de solo era 74% menor que o valor da macroporosidade na parcela arada, na mesma situação, mostrando que as parcelas eram heterogêneas quanto aos valores médios de macroporosidade. Após a colheita, houve um incremento de 83% da macroporosidade na parcela escarificada e uma redução de 16% na parcela arada. As diferenças entre médias são significativas no nível de 5% na parcela arada, na situação antes do preparo e após colheita. Para a parcela escarificada, as diferenças entre médias são significativas ao nível de 1%.

Os dados após colheita, no entanto, apresentam altos valores da estatística "d", indicando desvio da normalidade, o que é expresso também pelo afastamento relativo entre média e mediana.

Tabela 1. Alguns parâmetros estatísticos da variável macroporosidade do solo na parcela que recebeu aração e escarificação amostrada antes do preparo de solo e após colheita

| Parâmetros Estatísticos | Tratamentos | | | |
|----------------------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| | Aração | | Escarificação | |
| | Antes do preparo | Após a colheita | Antes do preparo | Após a colheita |
| Média | 0,050 a | 0,042 b | 0,037 A | 0,068 B |
| Mediana | 0,050 | 0,035 | 0,036 | 0,059 |
| cv,% | 38,9 | 42,9 | 39,4 | 57,6 |
| d | 0,089 | 0,169 | 0,097 | 0,140 |

d crítico a 5% = 0,200 (Campos, 1983); letras minúsculas diferentes, significam diferenças significativas no nível de 5%; letras maiúsculas diferentes, significam diferenças significativas no nível de 1%

Para as duas parcelas, na situação antes do preparo e após a colheita, os valores de macroporosidade são mostrados nas Figuras 1a e 1b, que representam os valores da macroporosidade nas parcelas experimentais, respeitando o número de ordem de cada amostra no espaço, entretanto, sem georeferenciá-los.

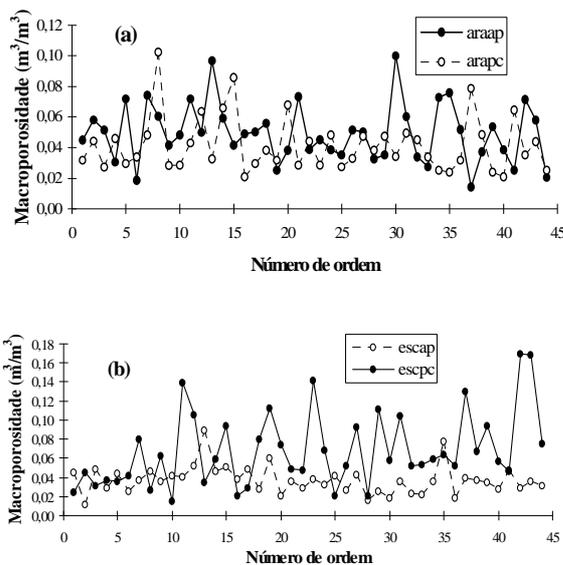


Figura 1. Macroporosidade na aração (a), amostrada antes do preparo (araap) e amostrada após a colheita (arapc) e na escarificação (b), amostrada antes do preparo (escap) e amostrada após a colheita (escpc)

Tanto a aração como a escarificação aumentaram o coeficiente de variação. Entretanto, o preparo vertical do solo proporcionou incremento de 46% no coeficiente de variação contra apenas 4% de incremento na parcela arada. Isso mostra que a escarificação, que revolve parcialmente o solo, proporcionou maior heterogeneidade da propriedade macroporosidade, comparativamente à aração. Estes resultados coadunam com aqueles apresentados por Souza (1992), onde a escarificação promoveu maior heterogeneidade nas concentrações de fósforo e potássio no solo.

Na Figura 2, são mostrados os semivariogramas experimentais escalonados pelas variâncias amostrais, para as duas parcelas, antes do preparo.

Como os semivariogramas experimentais mostraram comportamento muito semelhante dos pontos dentro de um alcance que pode ser admitido como único, igual a 10m, optou-se por ajustar um único modelo a ambos. Este resultado mostra claramente que, para esta propriedade, as duas parcelas apresentaram estrutura de dependência espacial semelhante antes do preparo de solo, apesar de apresentarem médias ligeiramente diferentes. Os dados

para aração nas duas amostragens estão na Figura 3a. Este sistema pouco atuou na profundidade de 0,20m, porém, a diferença entre médias é significativa no nível de 5%. Este sistema de preparo mobiliza maior volume de solo. Caracteriza-se também por aumentar o índice de compressibilidade do solo tornando-o mais suscetível ao tráfego, o que justifica a redução dos valores de macroporosidade. A dispersão em torno da média praticamente não se alterou. Na parcela sob escarificação, conforme mostrado na Figura 3b, as mudanças foram substanciais. Esse sistema de preparo promoveu aumento dos valores de macroporosidade, gerando médias diferentes no nível de 1%. A dispersão dos dados aumentou. De fato, o sistema não atuou uniformemente em toda a superfície. Caracterizou-se por promover o máximo de mobilização do solo nas linhas definidas pela passagem das hastes, efeito que se reduziu na direção das entre-linhas.

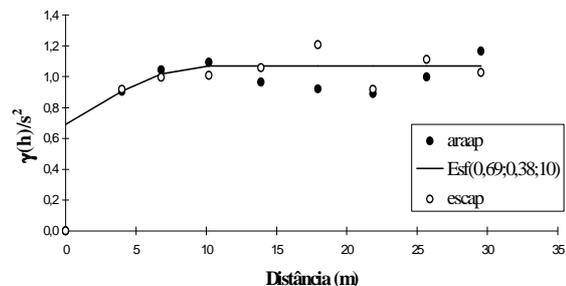


Figura 2. Semivariogramas escalonados pela variância amostral para a macroporosidade amostrada antes do preparo de solo nas parcelas sob (araap) aração e sob escarificação (escap)

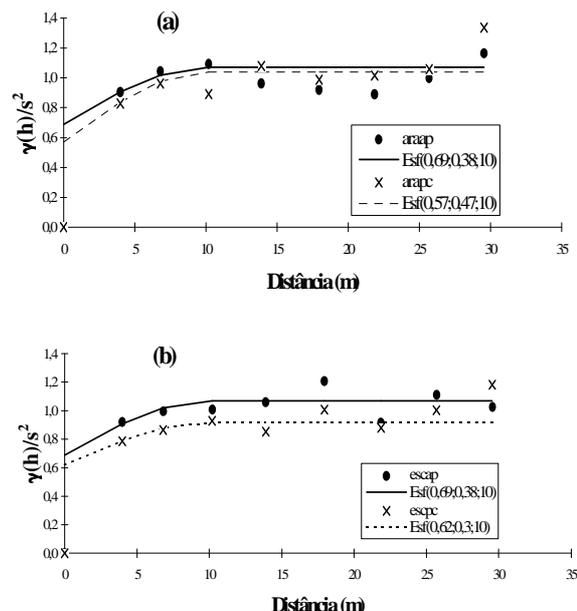


Figura 3. Semivariogramas escalonados pela variância amostral e modelos ajustados, na parcela que recebeu aração (a) e escarificação (b) para os valores de macroporosidade amostrados antes do preparo de solo e após a colheita

A ocorrência dos altos valores fez com que a distribuição de freqüências se ajustasse melhor a log-normal, segundo o teste de K-S, no nível de 5%. O padrão de valores de macroporosidade, promovido pela escarificação, é atribuído à ação particular do implemento que, além de atenuar os efeitos da carga imposta ao solo pelo trator, manteve ou incrementou a continuidade do sistema poroso que foi suscetível ao tráfego (Culley e Larson, 1987) e que é de fundamental importância para o rápido fluxo de água no perfil do solo (Beven e German, 1982). Ratificando ainda o resultado encontrado, Thomasson (1978) frisa que, quando a macroporosidade do solo está entre 0,05 e 0,10 m³/m³, a continuidade do sistema poroso é tão ou mais importante que o seu volume. Nesse sentido, as Figuras 4, 5, 6 e 7 mostram a classificação estrutural do solo, segundo Thomasson (1978), mediante os tratamentos estudados.

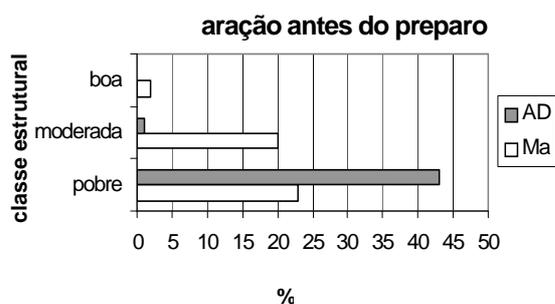


Figura 4. Classificação estrutural do solo em termos de Capacidade de água disponível (AD) e Macroporosidade (Ma) no tratamento que recebeu aração, na condição antes do preparo

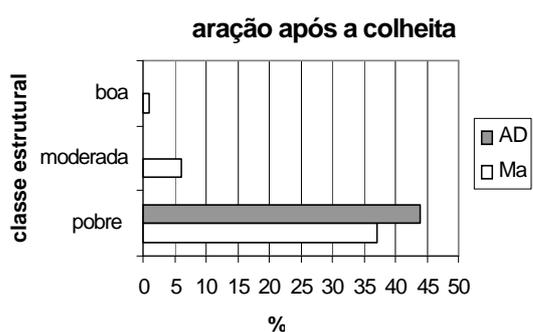


Figura 5. Classificação estrutural do solo em termos de Capacidade de água disponível (AD) e Macroporosidade (Ma) no tratamento que recebeu aração, na condição após colheita

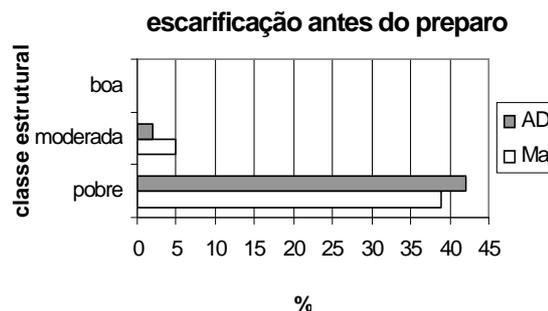


Figura 6. Classificação estrutural do solo em termos de Capacidade de água disponível (AD) e Macroporosidade (Ma) no tratamento que recebeu escarificação, na condição antes do preparo

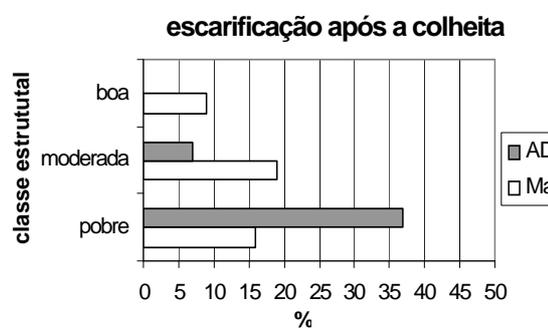


Figura 7. Classificação estrutural do solo em termos de Capacidade de água disponível (AD) e Macroporosidade (Ma) no tratamento que recebeu escarificação, na condição após colheita

Verifica-se que, apesar de os valores de macroporosidade e capacidade de água disponível, em média, denotarem uma pobre condição estrutural do solo, o tratamento escarificação conseguiu equilibrar a condição estrutural do solo, principalmente, no tocante à macroporosidade.

Cabe ressaltar que o efeito benéfico promovido pelas hastes do escarificador se manteve durante todo o ciclo da cultura, já que a produtividade na parcela que recebeu escarificação foi maior.

Na Tabela 2, são mostrados os parâmetros dos modelos esféricos ajustados aos semivariogramas experimentais, escalonados pela variância amostral, nas quatro condições estudadas. São mostrados também a variância amostral e o percentual do patamar referente ao efeito pepita.

Tabela 2. Parâmetros dos modelos ajustados aos semivariogramas experimentais

| Tratamentos | Situação | modelo | C ₀ ^(*) | C ₁ ^(**) | C ₂ ^(***) | (a) alcance | S ² (***) | C ₀ /C ₂ % ^(***) |
|---------------|------------------|----------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------|----------------------|---|
| Aração | Antes do preparo | esférico | 0,69 | 0,38 | 1,07 | 10 | 3,725 | 64 |
| Aração | Após a colheita | esférico | 0,57 | 0,47 | 1,04 | 10 | 3,187 | 55 |
| Escarificação | Antes do preparo | esférico | 0,69 | 0,38 | 1,07 | 10 | 2,176 | 64 |
| Escarificação | Após a colheita | esférico | 0,62 | 0,30 | 0,92 | 10 | 15,518 | 67 |

(*) - efeito pepita; (**) - sill (C₂ - C₀); (***) - patamar; (****) - variância; (*****) - relação entre efeito pepita e patamar

Os semivariogramas escalonados pela variância amostral (s^2) permitem constatar que a macroporosidade antes do preparo apresentou estrutura de variabilidade no espaço, com alcance da ordem de 10 m. A escarificação não modificou este alcance, atuando apenas no sentido de promover um crescimento do efeito pepita em relação ao patamar, como decorrência do aumento da variação da propriedade em distâncias inferiores à adotada como espaçamento. Na parcela sob aração, a redução dos valores de macroporosidade foi acompanhada de crescimento da média dos valores de densidade do solo, de 1,37 para 1,39Mg/m³. Na parcela sob escarificação, o aumento da macroporosidade foi acompanhada de redução da média dos valores da densidade do solo, de 1,42 para 1,34Mg/m³, após a colheita.

A aração não alterou os valores de macroporosidade na região amostrada e, considerando os valores médios de densidade do solo, esteve associada a um aumento do nível de compactação. A escarificação promoveu incremento da ordem de 83% nos valores médios da macroporosidade, o que provavelmente se manteve no decorrer do ciclo da cultura. A estrutura de dependência espacial, inicialmente igual para as duas parcelas, não foi substancialmente alterada pelos dois sistemas de preparo, exceto pelo fato de que a escarificação promoveu aumento do efeito pepita em relação ao patamar do semivariograma. A variação em pequenas distâncias promovida por este sistema de preparo está associada a este fato. A ação da escarificação foi benéfica, na área irrigada, permitindo melhor aeração, penetração das raízes e movimento vertical da água, o que é importante, principalmente, na extremidade da área irrigada pelo pivô-central.

Referências bibliográficas

- Beven, K.P.; German, P. Macropores and water flow in soils. *Wat. Resour. Res.*, 18:1311-1325, 1982.
- Campos, H. Estatística experimental não-paramétrica. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1983. 349p.
- Culley, J.L.B.; Larson, W.E. Susceptibility to compression of a clay loam haplaquol. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:562-567, 1987.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Embrapa). Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Manual de métodos de análise do Solo. Rio de Janeiro: 1979.
- Heermann, D.F.; Hein, P.R. Performance characteristics of self-propelled center-pivot sprinkler system. *Trans. ASAE*, 11(1):11-14, 1968.
- Silva, A.P. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo. Piracicaba, 1988. (Doctoral Thesis in Soil and Plant Nutrition) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- Souza, L.S. Variabilidade espacial do solo em sistemas de manejo. Porto Alegre, 1992. (Doctoral Thesis in Soil Sciences) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Thomasson, A.J. Towards an objective classification of soil structure. *J. Soil Sci.*, 29:38-46, 1978.
- Vieira, S.R.; Nielsen, D.R.; Biggar, J.M. Spatial variability of field-measured infiltration rate. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45:1040-1048, 1981.
- Vieira, S.R.; Lombardi Neto, F.; Burrows, I.T. Mapeamento da chuva máxima provável para o Estado de São Paulo. *Rev. Bras. Ciência do Solo*, 15(11):93-98, 1991.
- Vieira, S.R. Uso da geoestatística em estudos de variabilidade espacial. In: Curso de atualização em conservação do solo. Campinas: IAC, 1995. 61p.
- Webster, R.; Olivier, M.A. Statistical methods in soil and land resource survey. Oxford: Oxford University Press, 1990. 316p.

Received on October 21, 1997.

Accepted on February 25, 1998.