

Relação entre produtividade e resistência à penetração em área irrigada por pivô central, sob dois sistemas de preparo

José de Deus Viana da Mata^{1*}, Antônio Carlos Andrade Gonçalves¹, Sidney Rosa Vieira² e Marcos Vinicius Folegatti³

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. ³Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 13418-900, Piracicaba-São Paulo, Brazil. *Author for correspondence.

RESUMO. As modificações ocorridas na resistência à penetração de uma terra roxa estruturada submetida a dois sistemas de preparo de solo foram estudadas, no Centro Técnico de Irrigação da Universidade Estadual de Maringá (PR), entre agosto e dezembro de 1995. As determinações e amostragens foram realizadas em duas situações: antes do preparo do solo e após a colheita da cultura. Os resultados de penetrometria foram correlacionados com os valores de produtividade de biomassa e grãos da cultura de feijão, conduzida sob um pivô central. A falta de aleatoriedade na produtividade de biomassa e grãos, bem como na resistência à penetração, impediram que os testes estatísticos tradicionais mostrassem as interações solo - planta neste experimento. O semivariograma mostrou que os parâmetros de solo e planta analisados apresentaram estrutura de dependência espacial com alcance da ordem de 10 metros. Se, por um lado, a análise de regressão foi inadequada para identificar a forte correlação espacial existente entre a produtividade da cultura e o índice de cone, por outro lado, o semivariograma cruzado mostrou esta correlação.

Palavras-chave: resistência à penetração, produtividade, épocas de amostragens, sistemas de preparo, geoestatística.

ABSTRACT. Relationship between bean yield and penetrometer soil strength (PSS) in irrigated area under conventional tillage and chiseling. The changes in PSS of the soil submitted to conventional tillage and chisel plow were studied at the Technical Center of Irrigation of *Universidade Estadual de Maringá* (PR), August through December 1995. The PSS was sampled two times: before chiseling or conventional tillage and after harvesting. The PSS values were correlated with biomass and grain productivity for bean yield. The lack of randomness for biomass and grain productivity, and PSS did not allow application of traditional statistical tests to show the interactions between soil and plant in this field experiment. The spatial analysis showed that soil and plant attributes are space-dependent, within a range of approximately 10 meters. Regression analysis was inappropriate to identify the strong spatial relationship between plant productivity and PSS, but the cross semivariogram showed this relationship.

Key words: soil penetration resistance, yield, penetrometer, tillage system, geostatistics.

O desenvolvimento das raízes das culturas depende do tipo de planta e de fatores ecológicos. Mas, os mecanismos pelos quais estes fatores afetam o desenvolvimento radicular simultânea e quantitativamente durante o período vegetativo das culturas ainda estão obscuros (Baeumer, 1981).

Zonas de alta resistência são comuns em solos irrigados. A penetração de raízes pode ser reduzida se a resistência do solo passar de 1 MPa para 1,5 MPa. Isto pode resultar em decréscimo no

suprimento de água e nutrientes para as plantas (Miller, 1987). A cultura de feijão, particularmente, apresenta grande sensibilidade à compactação.

Em tratamentos com e sem subsolagem, Miller (1987) concluiu que, nas áreas sem subsolagem, as plantas sofreram mais acentuadamente a deficiência hídrica, culminando na necessidade de redução dos intervalos entre irrigações. Observou ainda que houve queda e abortamento de flores, o que promoveu um atraso na maturação da cultura de

duas semanas. O autor concluiu que é perfeitamente possível combinar o preparo vertical do solo com os intervalos entre irrigações, aumentando a eficiência da irrigação e proporcionando maior segurança na eventualidade de déficit hídrico, devido a falhas temporárias no equipamento de irrigação.

Letey (1991) discute a dificuldade de se estabelecer as relações entre a produtividade das culturas e as propriedades físicas do solo, mais especificamente a sua estrutura. O autor salienta que nutrientes, água, oxigênio, temperatura e resistência à penetração podem prejudicar a emergência das plântulas e o crescimento das raízes, todos afetando diretamente o desenvolvimento das plantas. Contudo, a estrutura do solo, por si só, não afeta diretamente o desenvolvimento das plantas.

Os fatores que afetam diretamente o desenvolvimento das plantas variam temporal e espacialmente no campo e não são independentes um do outro. A adoção de práticas de manejo que aumentam a capacidade de retenção de água de um solo pode contribuir para uma redução no suprimento de oxigênio para as plantas, caso a drenagem do solo em questão não seja adequada. Nesse sentido, sistemas de preparo de solo, comumente praticados em culturas de sequeiro, podem não ser os mais adequados para áreas irrigadas.

A teoria de que o sistema radicular das culturas comerciais em áreas irrigadas seja mais superficial que em condições de sequeiro, por simples acomodação, pode ser colocada em dúvida mediante a eventualidade da ocorrência de falhas temporárias no equipamento de irrigação ou então no caso de culturas de porte alto. Estas podem ser afetadas diretamente por outros eventos, mas a causa principal poderia ser o impedimento mecânico do solo ao estabelecimento normal do sistema radicular.

Assim, o objetivo deste trabalho foi correlacionar a produtividade da cultura de feijão com os valores de resistência à penetração do solo sob dois sistemas de preparo. A distribuição espacial dos valores dos parâmetros de solo e de planta foi avaliada antes do preparo e após a colheita da cultura, com o propósito de verificar a sua correlação espacial.

Material e métodos

O experimento foi conduzido no Centro Técnico de Irrigação da Universidade Estadual de Maringá, no município de Maringá, região noroeste do Estado do Paraná - Brasil, com localização de 23°24'36" de latitude sul e 51°56'34" de longitude oeste e altitude média de 540 metros.

O clima predominante, segundo a classificação de Koeppen, é do tipo Cfa, mesotérmico úmido com chuvas abundantes no verão e inverno seco, com precipitação média anual de 1.500 mm.

O solo da área experimental foi classificado como Terra Roxa Estruturada Eutrófica (Paleudalf) com A moderado, textura argilosa, fase floresta tropical subperenifólia, relevo suave ondulado (Embrapa, 1984), com declividade média de 8%.

A área experimental encontra-se sob um pivô central e vem sendo cultivada desde 1987 com milho, soja, aveia e feijão. Até 1989, o sistema de preparo de solo era executado com uma gradagem pesada e duas gradagens niveladoras. A partir de 1989, vem sendo mantida uma alternância de sistemas de preparo: escarificação antes da cultura de verão e gradagem pesada antes da cultura de inverno.

A escolha e o estaqueamento da área experimental foi realizada na segunda quinzena de julho de 1995. Foram dispostas contiguamente duas parcelas medindo 40m por 12m, as quais constituíram dois retângulos com 4 linhas dispostas paralelamente ao sistema de terraceamento existente e 11 colunas dispostas no sentido da declividade do terreno, perfazendo 44 pontos de amostragem em malha de 4 x 4m.

As determinações e amostragens foram realizadas em duas épocas distintas. Uma, antecedendo as operações de preparo de solo e a outra, imediatamente após a colheita da cultura.

Na primeira quinzena de agosto de 1995, foi iniciada a primeira fase de determinações e amostragens do experimento (antes do preparo), que consistiram na determinação da resistência à penetração nas profundidades de 0 - 0,10m (camada superficial); 0,10 - 0,20m (camada intermediária); 0,20 - 0,30m (camada profunda).

Logo após a primeira fase de determinações e amostragens a campo, procedeu-se à operação de preparo do solo nas duas parcelas experimentais. Uma recebeu, como preparo primário, uma aração com arado fixo de três discos de 26" e, como preparo secundário, duas gradagens niveladoras e destorroadoras com grade de 18 discos de 20".

A outra parcela recebeu, como preparo primário, uma escarificação com escarificador de sete hastes distanciadas de 0,25m. O preparo secundário consistiu de duas gradagens niveladoras e destorroadoras, com grade de 18 discos de 20".

Após a calibração do anel dinamométrico em célula de carga, determinou-se a resistência à penetração nas parcelas que receberam aração e escarificação. O procedimento foi efetuado nos 44 pontos amostrais, antes do preparo do solo e após a

colheita, na camada de 0 a 0,30 metros. Os valores de deformação do anel foram registrados de 0,05 em 0,05 metros.

Foi utilizado um penetrômetro com diâmetro da área da base do cone de 6,33 cm² e ângulo de penetração do cone de 30°. Antes das determinações, a área foi irrigada com uma lâmina de água de 15 mm, suficiente para deixar o solo com conteúdo de água próximo à capacidade de campo. Junto com os testes de penetração, foi medida a umidade do solo na área experimental.

Os resultados de resistência à penetração foram representados pelas médias obtidas para as camadas superficial (0 - 0,10 m), intermediária (0,10 - 0,20 m) e profunda (0,20 - 0,30 m) e foram expressos na forma de Índice de cone.

Em 24 de agosto de 1995, foi implantada a cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), variedade Aporé, nas duas parcelas experimentais. Uma semeadora convencional foi regulada para depositar 14 sementes por metro linear com espaçamento entre linhas de 0,40m, dando origem a uma população da ordem de 300.000 plantas por hectare.

Nos dias 29 e 30 de novembro de 1995, após o restabelecimento dos 44 pontos de cada parcela experimental, efetuou-se a colheita da cultura cortando-a manualmente, rente ao solo, em sub-parcelas de 4 m². Através de uma armação guia, fez-se coincidir o centro das mesmas com os pontos pré-estabelecidos antes da implantação da cultura. Foram tomados os devidos cuidados para manter 110 (cento e dez) plantas dentro da armação de amostragem. Foram determinadas produtividade de massa total e produtividade de grãos (Mg/ha), após correção da umidade para 12%.

Semivariogramas foram utilizados para avaliar a dependência espacial dos parâmetros do solo e da cultura do feijão e para se fazer a interpolação dos valores das variáveis adotadas, por meio de krigagem. O uso das técnicas geoestatísticas é descrito detalhadamente em Gonçalves (1997) e Viana da Mata (1997). As superfícies resultantes permitiram a comparação dos efeitos dos tratamentos sobre os parâmetros de solo e de planta. O semivariograma experimental (Journel, 1989) foi 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 de valores da propriedade z, medidos em pontos separados pelo vetor h.

A dependência espacial dos parâmetros de solo e de planta foi avaliada através do ajuste de um modelo

matemático aos semivariogramas escalonados pela variância amostral. Neste trabalho, o modelo esférico (McBratney e Webster, 1986) foi ajustado a todos os semivariogramas:

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= C_0 + C_1 [3/2 (h/a) - 1/2 (h/a)^3] \text{ para } 0 < h < a \\ \gamma(h) &= C_0 + C_1 \text{ para } h > a \end{aligned} \quad (02)$$

Com o objetivo de comparar e/ou combinar os semivariogramas, estes foram escalonados (Isaaks e Srivastava, 1989), sendo utilizado o procedimento descrito por Gonçalves *et al.* (1999), com o uso das variâncias amostrais. O modelo matemático foi ajustado visualmente ao semivariograma experimental. Em seguida, foi usada a técnica de validação cruzada para otimizar os coeficientes do modelo. Após conclusão da existência de dependência espacial dos parâmetros do solo e planta e a definição dos parâmetros do modelo ajustado ao semivariograma (C_0 = efeito pepita; C_1 = sill; a = alcance, C_2 = patamar), procedeu-se à interpolação dos valores das propriedades para distâncias não amostradas (1m x 0,5m) através da técnica da krigagem (Vieira *et al.*, 1983), o que possibilitou a construção de superfícies de valores dos parâmetros do solo e planta.

Para correlacionar espacialmente a produtividade da cultura com o índice de cone, foi construído o semivariograma cruzado destas propriedades, conforme descrito por Vauclin *et al.* (1983). O semivariograma cruzado é dado pela expressão:

$$\gamma_{12}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z_1(x_i) - z_1(x_i + h)] [z_2(x_i) - z_2(x_i + h)] \quad (03)$$

onde **N (h)** é o número de valores separados pelo vetor **h**, **z₁** representa a propriedade **1** e **z₂** a propriedade **2**. O semivariograma cruzado é calculado apenas para os locais onde as duas variáveis foram medidas (Bhatti *et al.*, 1991).

Resultados e discussão

Na parcela sob aração, antes do preparo, a variabilidade da resistência à penetração diminuiu com a profundidade, o que é expresso pelos coeficientes de variação mostrados na Tabela 1. Souza (1992) verificou comportamento semelhante. Na parcela sob escarificação, antes do preparo, o mesmo comportamento é observado. A ação diferenciada dos sistemas de preparo é evidenciada pelo crescimento do coeficiente de variação com a profundidade, na parcela sob escarificação, após a colheita, invertendo o comportamento inicial. Na parcela sob aração o padrão inicial não é alterado.

Nas quatro condições estudadas, os valores médios de resistência à penetração aumentaram com a profundidade, de forma semelhante ao que ocorre com o conteúdo de argila (Figura 1). Na parcela sob aração, os valores médios cresceram entre antes do preparo e após a colheita. Na parcela sob escarificação, a camada intermediária, onde se concentra o sistema radicular da cultura, apresenta redução da resistência à penetração, evidenciando a ação benéfica deste sistema de preparo.

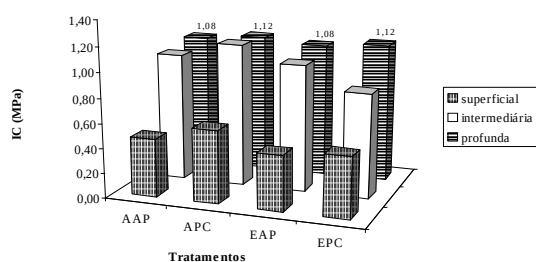


Figura 1. Valores médios de índice de cone no tratamento que recebeu aração e foi amostrado antes do preparo (AAP) e após a colheita (APC) e no tratamento que recebeu escarificação e foi amostrado antes do preparo (EAP) e após a colheita (EPC) nas camadas superficial, intermediária e profunda.

O índice de cone medido na camada intermediária (entre 0,10 e 0,20m de profundidade), nas parcelas referentes aos dois tratamentos, antes do preparo, apresentam distribuições semelhantes, como pode ser observado na Tabela 1. Os valores médios são praticamente iguais e a dispersão dos dados é expressa por um coeficiente de variação pouco superior para a parcela a ser submetida à aração. De acordo com Warrick e Nielsen (1980), esta propriedade pode ser caracterizada como de variação entre média e alta. Conforme a Tabela 1, a estatística do teste de Kolmogorov-Smirnov permite caracterizar estas duas distribuições como normal em nível de 5%, embora a assimetria e a curtose sejam maiores para a parcela sob aração. O valor máximo de 1,66 unidades identificado nesta parcela

promove esta assimetria mais acentuada que a verificada na parcela sob escarificação.

A estatística descritiva para produtividade da cultura, em termos de biomassa (Mg/ha) e grãos (Mg/ha), para as parcelas submetidas aos dois tratamentos, é apresentada na Tabela 2. Maiores produtividades de biomassa e de grãos foram obtidas na parcela sob escarificação, sendo as diferenças entre tratamentos significativas para $\alpha = 1\%$.

As distribuições dos dados podem ser caracterizados como de variação entre média e alta, conforme Warrick e Nielsen (1980). A aração promoveu maiores coeficientes de variação que a escarificação, embora esta tenha promovido maior variabilidade para a resistência à penetração. Todas as distribuições podem ser caracterizadas como normal pelo teste adotado, o que é confirmado pelos valores de assimetria relativamente baixos.

Os altos valores de resistência à penetração identificados na área em estudo sugerem uma possível relação entre produtividade da cultura e esta propriedade do solo, em função das restrições impostas ao desenvolvimento do sistema radicular. Para avaliar esta interação solo - planta, a análise de regressão pode ser usada, desde que se assumam *a priori* que estas variáveis são aleatoriamente distribuídas no espaço. A distribuição normal de ambas já foi assegurada.

A análise de regressão entre índice de cone na camada intermediária e a produtividade de grãos permitiu o ajuste de um modelo linear entre estas variáveis, para cada tratamento adotado, como pode ser visto na Figura 2. Na parcela sob escarificação, verifica-se uma tendência de decréscimo da produtividade com o aumento da resistência à penetração. Esta tendência não é significativa a 1% e o modelo ajustado apresenta coeficiente de determinação (r^2) de 0,09, ou seja, uma correlação linear de apenas 0,3.

Tabela 1. Momentos estatísticos para os valores de índice de cone no tratamento aração, amostrado antes do preparo e após a colheita e no tratamento escarificação, amostrado antes do preparo e após a colheita, nas camadas superficial (0 - 0,10m), intermediária (0,10 - 0,20 m) e profunda (0,20 - 0,30 m)

Momentos Estatísticos	Aração						Escarificação					
	Antes do Preparo			Após colheita			Antes do preparo			Após colheita		
	0-0,10m	0,10-0,20m	0,20-0,30m	0-0,10m	0,10-0,20m	0,20-0,30m	0-0,10m	0,10-0,20m	0,20-0,30m	0-0,10m	0,10-0,20m	0,20-0,30m
Média	0,47	1,03	1,08	0,59	1,15	1,12	0,44	1,02	1,08	0,49	0,84	1,12
Mediana	0,46	1,00	1,03	0,58	1,16	1,14	0,42	1,02	1,06	0,48	0,82	1,13
Variância	0,02	0,06	0,02	0,02	0,05	0,04	0,01	0,04	0,03	0,01	0,07	0,13
d.p.	0,13	0,24	0,16	0,16	0,22	0,20	0,11	0,19	0,17	0,10	0,26	0,35
Assimetria	0,33	0,54	0,67	0,24	-0,35	-0,59	0,85	0,12	0,02	0,26	0,38	0,69
Curtose	-0,68	0,55	-0,34	-0,66	-0,30	0,96	0,49	0,11	-0,90	0,00	-0,97	0,12
cv %	27,7	23,3	14,8	27,1	19,1	17,9	25,0	18,6	15,7	20,4	31,0	31,3
d	0,09	0,14	0,17	0,11	0,06	0,07	0,19	0,07	0,10	0,07	0,12	0,15

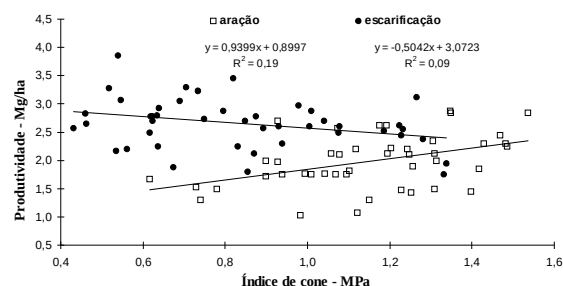
d crítico a 5% = 0,200 (Campos, 1983)

Tabela 2. Momentos estatísticos para o rendimento (Mg/ha) de massa total e de grãos nos tratamentos sob aração e sob escarificação

Momentos Estatísticos	Rendimento, Mg/ha			
	Aração		Escarificação	
	Massa Total	Grãos	Massa Total	Grãos
N	44	44	44	44
Média	4,13b	1,98d	5,66a	2,65c
Mediana	4,10	1,99	5,44	2,64
Variância	0,59	0,22	0,86	0,19
Assimetria	-0,03	0,09	0,06	0,18
Curtose	-0,54	-0,53	-0,24	0,55
cv, %	18,5	23,9	16,4	16,4
d	0,09	0,07	0,113	0,09

d crítico a 5%: 0,200 (Campos, 1983); *médias com letras iguais na escarificação e na aração não diferem entre si ao nível de 1% de probabilidade pelo teste t

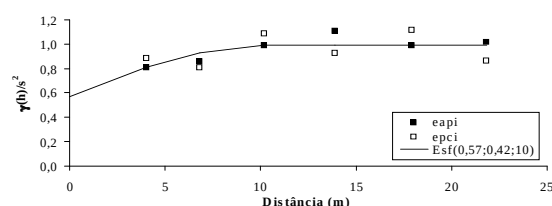
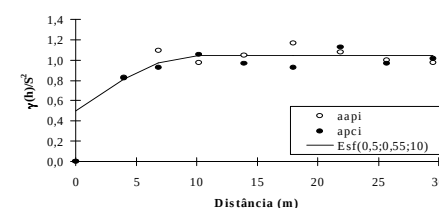
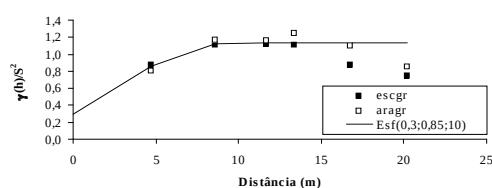
Na parcela sob aração, o modelo linear ajustado expressa uma proporcionalidade direta entre as variáveis analisadas. Como este sistema de preparo agiu de forma inconveniente na camada intermediária, aumentando a resistência média à penetração, este resultado apenas expressa que a produtividade sob este tratamento foi em função de outros fatores que não o índice de cone.

**Figura 2.** Regressões entre produtividade e índice de cone na camada intermediária, para as parcelas sob aração e escarificação

A hipótese de independência espacial dos dados de produtividade e de índice de cone pode ser avaliada por meio da geoestatística. Na Figura 3, são apresentados os semivariogramas experimentais escalonados pela variância amostral para o índice de cone na parcela sob escarificação, na camada intermediária, antes do preparo e após a colheita. Foi ajustado um único modelo experimental a ambos, sendo possível concluir que a ação de preparo não mudou a estrutura de dependência espacial desta propriedade. Para a parcela sob aração, os semivariogramas para a camada intermediária, antes do preparo e após a colheita, são mostrados na Figura 4. Também para esta parcela, foi usado um único modelo teórico, o que permite afirmar que nesta parcela o sistema de preparo não afetou a distribuição espacial dos dados.

Na Figura 5, são mostrados os semivariogramas experimentais para produtividade nas duas parcelas e

o modelo ajustado, único para os dois tratamentos. Os parâmetros dos modelos são apresentados na Tabela 3. O domínio desta propriedade é semelhante ao identificado para o índice de cone, da ordem de 10m, e coincide com o alcance dos semivariogramas obtidos por Viana da Mata *et al.* (1998), para dados de macroporosidade do solo, nessa área experimental. Constatou-se que 74% da variação total dos dados é explicada pela dependência espacial, sendo o efeito pepita correspondente a 26% do patamar.

**Figura 3.** Semivariogramas escalonados para índice de cone na parcela sob escarificação, na camada intermediária, na situação antes do preparo (eapi) e após a colheita (epci)**Figura 4.** Semivariogramas escalonados para índice de cone na parcela sob aração, na camada intermediária, na situação antes do preparo (aapi) e após a colheita (apci)**Figura 5.** Semivariogramas experimentais e modelo ajustado para produtividade de grãos, na parcela sob escarificação (escgr) e na parcela sob aração (aragr)

Os semivariogramas apresentam estrutura de variação no espaço das propriedades índice de cone e produtividade, negando a hipótese de independência espacial. As inter-relações espaciais entre estas variáveis podem ser avaliadas por meio da geoestatística, com o uso do semivariograma cruzado. Para a parcela sob aração, este se mostrou sem estrutura. Para a escarificação, a estrutura se manifesta de forma bem definida, com alcance da

ordem de 15m e efeito pepita nulo, evidenciando a estreita correlação espacial entre as propriedades, como pode ser visto na Figura 6.

Tabela 3. Parâmetros dos modelos escalonados ajustados aos semivariogramas experimentais nos tratamentos que receberam aração (ara) e escarificação (esc) amostrados antes do preparo (ap) e após a colheita (pc) para as camadas superficial (s), intermediária (i) e profunda (p)

Tratamentos	Modelos	C_0	C_1	(a) alcance	C_2	$C_0/C_2 - \%$
araaps, araapi	esférico	0,5	0,62	10	1,12	44,6
araapp	esférico	0,47	0,56	10	1,03	45,6
arapcs, arapci, arapcp	esférico	0,5	0,55	10	1,05	47,6
escaps, escpcs,	esférico	0,72	0,33	13	1,08	66,7
escapi, escpci,	esférico	0,57	0,42	10	0,99	57,6
escapp, escpcp	esférico	0,62	0,4	10	1,02	60,8

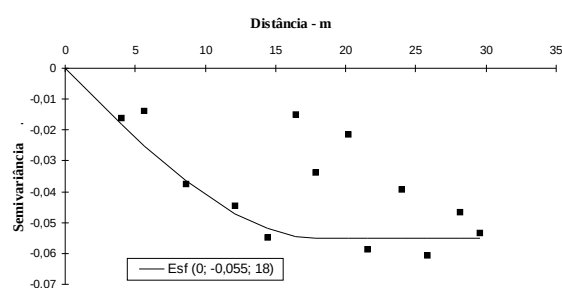


Figura 6. Semivariograma cruzado e modelo ajustado para produtividade e índice de cone na parcela sob escarificação, camada intermediária, após a colheita

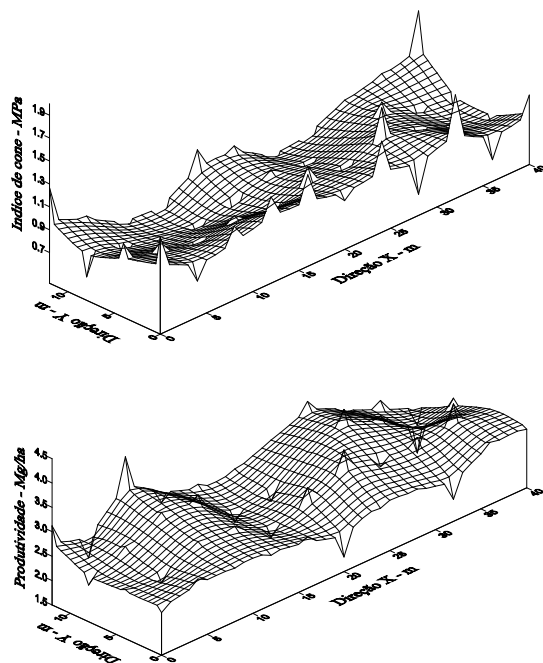


Figura 7. Superfícies de valores para índice de cone (MPa) e produtividade de grãos (Mg/ha) na camada intermediária da parcela que recebeu escarificação

Por meio de interpolação por “krigagem”, a partir dos modelos ajustados aos semivariogramas

experimentais, foram construídas as superfícies de valores de índice de cone na camada intermediária e de produtividade de grãos, para a parcela sob escarificação, mostradas na Figura 7. Produtividade e índice de cone não variam aleatoriamente, mas seguem padrões espaciais bem definidos e estreitamente inter-relacionados, com proporcionalidade inversa.

A aração não alterou o índice de cone na camada intermediária. Por outro lado, a escarificação sim, reduzindo a resistência média à penetração e aumentando a sua variabilidade. Os dois tratamentos não alteraram a estrutura de dependência espacial desta propriedade. Índice de cone e produtividade não se distribuem aleatoriamente na área. Apresentam estrutura de dependência espacial descrita por semivariogramas com alcance da ordem de 10 metros.

Produtividade é limitada pela resistência à penetração na camada intermediária. A ação benéfica da escarificação nesta camada está associada à forte correlação espacial entre os valores medidos para estas duas variáveis. A aração não promoveu redução da resistência à penetração na camada intermediária e a produtividade foi menor que sob escarificação, não apresentando correlação espacial entre os valores.

Referências bibliográficas

- Baeumer, K. Tillage effects on root growth and crop yield. In: Agricultural yield potentials in continental climates. In: COLLOQUIUM INTERNATIONAL POTASH INSTITUTE, 16, Bern, 1981. *Proceedings...* Bern, 1981. p. 57-75.
- Bhatti, A.U.; Mulla, D.J.; Koehler, F.E.; Gurmani, A.H. Identifying and removing spatial correlation from yield experiments. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55(6):1523-1528, 1991.
- Campos, H. Estatística experimental não paramétrica. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1983. 349 p.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Boletim Técnico nº 57. Curitiba, 1984. 791p.
- Gonçalves, A.C.A. *Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo para fins de manejo da irrigação*. Piracicaba, 1997. (Doctoral Thesis in Agronomy) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- Gonçalves, A.C.A.; Folegatti, M.V.; Silva, A.P. Estabilidade temporal da distribuição espacial da umidade do solo em área irrigada por pivô central. *Rev. Brasil. Ciênc. Solo*, 23(1):155-164, 1999.
- Isaaks, E.H.; Srivastava, R.M. An Introduction to applied geostatistics. New York: Oxford University Press, 1989. 561p.
- Journal, A.G. Fundamentals of geostatistics in five lessons. Washington: American Geophysical Union, 1989. 40 p.

- Letey, J. The study of soil structure: science or art. *Aust. J. Soil. Res.*, 29:699-707, 1991.
- McBratney, A.B.; Webster, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. *J. Soil Sci.*, 37:617-639, 1986.
- Miller, D.E. Effect of subsoiling and irrigation regime on dry bean production in the Pacific Northwest. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51:784-787, 1987.
- Souza, L.S. *Variabilidade espacial do solo em sistemas de manejo*. Porto Alegre, 1992. (Doctoral Thesis in Agronomy) Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Vauclin, M.; Vieira, S.R.; Vachaud, G.; Nielsen, D.R. The use of cokriging with limited soil observations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47:175-184, 1983.
- Viana da Mata, J.D. *Variabilidade espacial de indicadores da compactação de terra roxa estruturada, sob dois sistemas de preparo, cultivada com feijão (Phaseolus vulgaris L.) irrigado*. Piracicaba, 1997. (Doctoral Thesis in Agronomy) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- Viana da Mata, J.D.; Gonçalves, A.C.A.; Vieira, S.R.; Variabilidade espacial da macroporosidade do solo em área irrigada, antes do preparo e após a colheita, sob dois sistemas de preparo. *Acta Scientiarum*, 20(3):307-312. 1998.
- Vieira, S.R.; Hatfield, J.L.; Nielsen, D.R.; Biggar, J.W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, 51(3):1-75, 1983.
- Warrick, A.W.; Nielsen, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel, D. (Ed.) *Applications of soil physics*. New York: Academic Press, 1980. p.314-344.

Received on June 29, 1999.

Accepted on August 21, 1999.