



Revista Brasileira de Ciências Agrárias

ISSN: 1981-1160

editorgeral@agraria.pro.br

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Brasil

Arzeno, Jose L.; Vieira, Sidney R.; Siqueira, Glecio M.; Guedes Filho, Osvaldo  
Variabilidade espacial da resistência à penetração na superfície do solo em sistemas de manejo  
Revista Brasileira de Ciências Agrárias, vol. 9, núm. 3, 2014, pp. 343-352  
Universidade Federal Rural de Pernambuco  
Pernambuco, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=119032103005>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal  
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

## Variabilidade espacial da resistência à penetração na superfície do solo em sistemas de manejo

Jose L. Arzeno<sup>1</sup>, Sidney R. Vieira<sup>2</sup>, Glecio M. Siqueira<sup>3</sup>, Osvaldo Guedes Filho<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Tecnologia Agropecuaria, Centro Regional Salta Jujuy, Santiago del Estero, C.C 228 1463 (4400), Salta, Provincia de Salta, Argentina. E-mail: jarzeno@correo.inta.gov.ar

<sup>2</sup> Instituto Agronômico de Campinas, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Solos e Recursos Ambientais, Av. Theodureto de Almeida Camargo, 1.500, CEP 13075-630, Campinas-SP, Brasil. Caixa Postal 28. E-mail: sidney@iac.sp.gov.br

<sup>3</sup> Universidade Federal do Maranhão, Centro de Ciências Agrárias e Ambientais, BR-222, KM 04, S/N, Boa Vista, CEP 65500-000, Chapadinha-MA, Brasil. E-mail: gleciosiqueira@hotmail.com

<sup>4</sup> Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Agrárias e Tecnológicas, Rodovia Rondonópolis-Guiratinga (MT-270), km 06, Parque Sagrada Família, CEP 78735901, Rondonópolis-MT, Brasil. E-mail: osvaldoguedes@yahoo.com.br

### RESUMO

O objetivo deste trabalho foi analisar a variabilidade espacial da resistência superficial do solo à penetração no sistema de semeadura direta, escarificado e convencional. O experimento foi conduzido no Centro Experimental Central do Instituto Agronômico, Campinas, SP, Brasil. A resistência superficial do solo à penetração foi medida utilizando-se penetrômetro de bolso modelo CL-700, após a colheita de milho e soja, em parcelas experimentais, com três repetições para cada um dos diferentes sistemas de manejo. Os valores das médias são semelhantes entre as repetições. As maiores diferenças entre os tratamentos podem ser atribuídas às diferenças de umidade do solo no momento das amostragens. A análise espacial permitiu a determinação de linhas de tendência com maior resistência à penetração na superfície do solo principalmente no sistema de semeadura direta. A variabilidade espacial da resistência à penetração na superfície do solo apresentou, em todos os tratamentos, baixa continuidade espacial.

**Palavras-chave:** agregação, compactação, física do solo, preparo do solo

## *Spatial variability of soil mechanical resistance to the surface management systems*

### ABSTRACT

The objective of this study was to analyze the spatial variability of soil surface resistance to penetration in no-tillage system, chisel plow and conventional tillage. The experiment was conducted at the Centro Experimental Central, Instituto Agronômico (IAC), Campinas, SP, Brazil. The resistance to penetrate the soil surface was measured using a hand penetrometer model CL-700, in three replications after the harvest of corn and soybeans for each of the different management systems. The average values are similar between replications. The major differences between the penetration resistance can be attributed to differences in soil moisture at the time of sampling. The spatial analysis allowed the determination of trend lines with greater resistance to penetration in the soil surface mainly in the no-tillage system. The spatial variability of the resistance to penetration in the soil surface in all treatments revealed low spatial continuity.

**Key words:** soil aggregation, compaction, soil physics, soil tillage

## Introdução

A mecanização dos sistemas de produção agrícola modifica as características naturais do solo favorecendo, em muitos casos, a formação de camadas compactadas que exercem influência principalmente sobre a capacidade de aeração e a capacidade de infiltração do meio. Neste sentido, a utilização de sistemas conservacionistas de preparo do solo ajuda a manter suas características naturais, uma vez que nesses sistemas de manejo a estrutura do solo é beneficiada pela manutenção da palha em cobertura e pelo menor tráfego de máquinas (Kondo & Dias Júnior, 1999; Pikul & Aase, 2003; Silva et al., 2005).

De acordo com Hill & Meza-Montalvo (1990) o tráfego de máquinas aumenta os valores de densidade do solo e a resistência à penetração em até 50%, quando comparado com áreas não trafegadas. Isto se deve principalmente ao peso das máquinas agrícolas que contribui para um rearranjo das partículas do solo com diminuição da porosidade e aumento da densidade (Costa et al., 2003; Beutler & Centurion, 2004).

O tráfego de máquinas favorece a compactação superficial do solo sobretudo de maneira regionalizada. Por outro lado, Kondo & Dias Júnior (1999) relatam que os diferentes sistemas de manejo alteram as propriedades físicas e mecânicas do solo com diversos níveis de compactação em função do teor de água, das diferentes classes de solos e da época de realização das operações mecanizadas.

Camargo et al. (1997) descrevem que a compactação do solo agrícola é um conceito complexo e de difícil descrição e mensuração intimamente relacionado com os atributos físicos, químicos. Segundo Imhoff et al. (2000) e Beutler & Centurion (2004) a compactação do solo é comumente avaliada por meio da resistência do solo à penetração devido à sua boa correlação com o crescimento radicular e à produtividade das plantas. Tormena et al. (2002) ressaltam que a resistência do solo à penetração é modificada pelos sistemas de preparo do solo. A quantificação da resistência mecânica do solo à penetração induzida por meio do manejo do solo, é um aspecto relevante para a manutenção de índices desejáveis de produção e de sustentabilidade ambiental (Arshad et al., 1996; Silva et al., 2000; Costa et al., 2003; Pikul & Aase, 2003; Grego & Vieira, 2005; Silva et al., 2005).

O uso da geoestatística na agricultura favorece a modelagem da variabilidade espacial dos mais diversos atributos de solo e planta (Vieira, 2000) possibilitando o entendimento de muitos parâmetros até então ignorados. De acordo com Grego & Vieira (2005) e Siqueira et al. (2012) a ampla diversidade dos resultados dos estudos de variabilidade espacial dos atributos físicos do solo está associada, em parte, ao sistema de manejo adotado. Desta maneira, o estudo da variabilidade espacial da resistência à penetração na superfície do solo favorece a compreensão de como o tráfego de máquinas e implementos agrícola afetam o solo. Assim, objetivou-se, com este trabalho, avaliar a variabilidade espacial da resistência à penetração na superfície do solo em distintos sistemas de manejo (semeadura direta, preparamos escarificador e convencional).

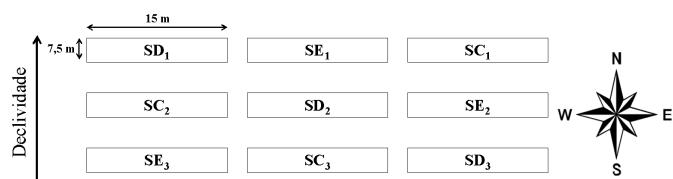
## Material e Métodos

O estudo foi realizado no Centro Experimental Central do Instituto Agronômico, em Campinas. O solo da área, de acordo

com a classificação Embrapa (2006) é um Latossolo Vermelho distroférreo, textura argilosa (Tabela 1), com relevo pouco movimentado, altitude média de 660 m e com as seguintes coordenadas geográficas: latitude 22° 53' Sul e longitude 47° 04' Oeste. Na Figura 1 são apresentados a disposição dos tratamentos e o sentido da declividade na área de estudo.

**Tabela 1.** Composição granulométrica do solo da área de estudo

Profundidade	Argila	Silte	Areia fina	Areia grossa
m	%	%	%	%
0,0-0,35	54	17	23	6
0,35-0,68	64	8	23	5
0,68-1,20	66	8	20	6
1,20-2,00	64	10	22	4
+2,00	64	8	25	3



**Figura 1.** Esquema de distribuição das parcelas experimentais na área de estudo

Os tratamentos consistiram de três sistemas de preparo com três repetições: semeadura direta ( $SD_1$ ,  $SD_2$  e  $SD_3$ ), sistema escarificador ( $SE_1$ ,  $SE_2$  e  $SE_3$ ) e sistema convencional ( $SC_1$ ,  $SC_2$  e  $SC_3$ ). O preparo com escarificador consistiu de preparo primário com arado escarificador, com hastes de 0,25 m entre sulcos, a 0,30 m de profundidade, seguido de duas gradagens niveladoras e semeadura enquanto o preparo convencional consiste de preparo primário com arado de discos incorporando os restos da cultura anterior, seguido de duas gradagens niveladoras e semeadura.

As medições foram realizadas em parcelas experimentais de 15,0 x 7,5 m cultivadas com milho (*Zea mays* L.) e soja (*Glycine max* L.) em cultivo contínuo no verão e aveia preta (*Avena strigosa* Schreb) no inverno. A determinação da resistência à penetração na superfície do solo ( $kg\ cm^{-2}$ ) foi realizada utilizando-se o penetrômetro de bolso modelo CL-700 fabricado pela SOILTEST com três repetições, após a colheita do milho e da soja, empregando-se um retângulo de madeira (0,6 x 0,9 m) em uma grade de amostragem de 0,5 m x 0,5 m (totalizando 216 pontos de amostragem). A localização do retângulo de madeira em cada parcela foi feita com o maior comprimento no sentido da fileira de plantio e, portanto, perpendicular ao preparo primário do solo. As leituras do penetrômetro de bolso ( $kg\ cm^{-2}$ ) foram transformadas para MPa, conforme descrito por Arshad et al. (1996).

Amostras indeformadas de solo foram coletadas com quatro repetições nos diferentes sistemas de preparo, em trincheiras (1 m<sup>2</sup>) na camada de 0,0-0,1 m de profundidade através de anéis volumétricos de 100 cm<sup>3</sup>, para a determinação da densidade ( $Mg\ m^{-3}$ ), porosidade total (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) e umidade (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) segundo a metodologia proposta por Camargo et al. (1986).

Os dados foram analisados utilizando-se o software STAT, de acordo com Vieira et al. (2002) que possibilitaram

a determinação dos principais parâmetros estatísticos (média, variância, DP - desvio padrão, CV – coeficiente de variação, coeficiente de assimetria e curtose). A presença de valores extremos (“outliers”) foi avaliada por meio da Eq. (1), conforme procedimentos descritos por Siqueira et al. (2009):

$$V_e = \bar{X} \pm 4\sigma \quad (1)$$

em que:  $V_e$  representa os valores extremos mínimo e máximo;  $\bar{X}$  é média e  $\sigma$  é o desvio padrão.

O software AVARIO (Vieira et al., 2002) foi utilizado para determinação dos pares de semivariância. O semivariograma experimental (Eq. 2) foi ajustado para os pares de semivariância, de acordo com o procedimento descrito por Vieira (2000), onde:

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

em que:  $\gamma^*(h)$  – é a semivariância estimada;  $N(h)$  - representa o número de pares de valores medidos  $Z(x_i)$ ,  $Z(x_i + h)$  separadas por um vetor ( $h$ ). Desta maneira foi possível determinar os parâmetros de ajuste do semivariograma. O efeito pepita ( $C_0$ ) representa a descontinuidade entre amostra, ou seja, a variabilidade não detectada, durante o processo de amostragem, a variância estrutural ( $C_1$ ) e descreve até que ponto existe correlação entre as amostras e o alcance ( $a$ ) representando o tamanho máximo das zonas de variabilidade espacial.

Os modelos matemáticos ajustados aos semivariogramas permitiram visualizar a estrutura de variação espacial das variáveis. Os critérios e procedimentos para ajuste do semivariograma foram realizados conforme Vieira et al. (1983) considerando-se os métodos dos mínimos quadrados ordinários e mínimos quadrados ponderados e a validação cruzada. A análise estatística inicial procurou verificar a presença de tendência dos dados, por meio do software TREND (Vieira et al., 2002).

A razão de dependência espacial ( $RD$ , Eq. 3) entre amostras foi determinada conforme classificação descrita por Cambardella et al. (1994), em que: 0-25 % alta, 25-75 % média e 75-100 % baixa dependência espacial entre amostras.

$$RD = \left( \frac{C_0}{C_0 + C_1} \right) \times 100 \quad (3)$$

A técnica de interpolação por *krigagem* (Eq. 4) foi utilizada para determinação dos valores para os locais não amostrados. Esta técnica utiliza a dependência espacial entre amostras vizinhas, expressa no semivariograma para estimar valores em qualquer posição dentro da área (Vieira, 2000).

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \quad (4)$$

O software SURFER 7.0 foi utilizado para a construção dos modelos tridimensionais da resistência mecânica do solo à penetração utilizando-se os valores determinados por meio da técnica de interpolação por krigagem.

## Resultados e Discussão

Na Tabela 2 se observa que o valor médio de densidade do solo ( $Mg\ m^{-3}$ ) para os três sistemas de preparo estudados, é menor para o tratamento com soja quando comparado ao do tratamento com milho. Silva et al. (2005) encontraram, estudando atributos físicos de um Argissolo Vermelho distrófico sob diferentes sistemas de preparo, valores de densidade do solo na camada de 0,0-0,075 m de profundidade de  $1,50\ Mg\ m^{-3}$ ,  $1,50\ Mg\ m^{-3}$  e  $1,47\ Mg\ m^{-3}$  para o sistema de preparo convencional, preparo escarificador e semeadura direta, respectivamente. Os valores descritos por esses autores são superiores aos encontrados neste estudo para a camada de 0,0-0,1 m de profundidade, sendo  $1,26\ Mg\ m^{-3}$  para o sistema de preparo convencional,  $1,33\ Mg\ m^{-3}$  para o preparo escarificador e  $1,31\ Mg\ m^{-3}$  para o sistema de semeadura direta. Valores mais elevados de densidade do solo têm sido relatados por outros autores para o sistema de semeadura direta (De Maria et al., 1999; Corsini & Ferrando, 1999; Tormena et al., 2002) quando comparado aos demais sistemas de preparo do solo. Todavia, para o presente estudo o sistema escarificador foi o que apresentou o maior valor de densidade ( $1,33\ Mg\ m^{-3}$ ).

**Tabela 2.** Valores médios da densidade ( $Mg\ m^{-3}$ ), porosidade total ( $m^3\ m^{-3}$ ) e umidade ( $m^3\ m^{-3}$ ) nos três sistemas de preparo do solo na camada de 0,0-0,1 m de profundidade

Tratamento	Densidade	Porosidade total	Umidade
	$Mg\ m^{-3}$	$m^3\ m^{-3}$	
Soja	SD	1,31	0,552
	SE	1,33	0,531
	SC	1,26	0,555
Milho	SD	1,36	0,550
	SE	1,41	0,560
	SC	1,40	0,586

SD: Semeadura direta; SE: Sistema escarificador; SC: Sistema convencional.

Tormena et al. (2002) obtiveram, estudando diferentes atributos físicos de um Latossolo Vermelho distrófico, maiores valores de porosidade total para o preparo com escarificador e para o preparo convencional, reflexo do revolvimento do solo neste sistema de preparo. Costa et al. (2003) descrevem, estudando atributos físicos de um Latossolo Vermelho com semeadura direta e preparo convencional, que o sistema de semeadura direta apresenta melhores condições estruturais que o sistema de preparo convencional favorecendo, portanto, a manutenção da porosidade do solo. Para o presente estudo o preparo convencional (SC) apresentou o maior valor de porosidade total (55,56%) seguido do sistema de semeadura direta (SD, 55,21%) e pelo preparo escarificador (SE, 53,19%).

O sistema de semeadura direta apresentou os maiores valores de umidade ( $m^3\ m^{-3}$ , Tabela 2) concordando com Costa et al. (2003) que também encontraram maiores valores de umidade na camada superficial do solo quando comparado com o sistema de preparo convencional devido, principalmente, ao fato de haver no sistema de semeadura direta, uma quantidade maior de água infiltrada no solo que, dentre outros fatores, é favorecida pela manutenção dos restos das culturas anteriores na superfície do solo, que

também impede a formação de selamento superficial (Schick et al., 2000; Costa et al., 2003).

Na Tabela 3 se apresentam os principais parâmetros da estatística descritiva para os dados de resistência do solo à penetração medida com penetrômetro de bolso nos diferentes tratamentos. Conforme já discutido, os tratamentos no solo cultivado com soja apresentaram os menores valores de densidade do solo (Tabela 2). Os valores médios de resistência do solo à penetração para os distintos tratamentos com soja (Tabela 3) demonstram maior variação, sobretudo para as repetições no sistema de semeadura direta ( $SD_1$ : 0,80 MPa,  $SD_2$ : 0,57 MPa e  $SD_3$ : 1,33 MPa). Este fato é confirmado pelos valores de coeficiente de variação ( $SD_1$ : 104,6 %,  $SD_2$ : 117,7 % e  $SD_3$ : 109,5 %). Todos os tratamentos estudados apresentaram valores de coeficientes de variação muito altos de acordo com a classificação proposta por Gomes & Garcia (2002).

De maneira geral, as diferenças entre os coeficientes de variação foram ocasionadas pela variabilidade do conteúdo de

argila e umidade do solo, nos distintos locais de amostragem, uma vez que a resistência mecânica do solo à penetração é dependente desses atributos (Vaz et al., 2002; Costa et al., 2003). Os valores médios da resistência à penetração na superfície do solo com penetrômetro de bolso são similares aos constatados por Costa et al. (2003) na camada de 0,0-0,05 m de profundidade, utilizando um equipamento similar. Por outro lado, Silva et al. (2005) encontraram, estudando a resistência do solo com penetrômetro de bolso na camada de 0,0-0,025 m de profundidade, valores de 0,48 MPa para o preparo convencional (PC), 0,28 MPa para o preparo com escarificador e 0,33 MPa para o sistema de semeadura direta (SD).

De acordo com a classificação de Arshad et al. (1996) os valores médios de resistência à penetração na superfície do solo nos diferentes sistemas de manejo são considerados baixos para soja  $SD_1$ ,  $SD_2$ ,  $SD_3$  e  $SE_1$  e milho  $SE_1$ ,  $SE_2$ ,  $SE_3$ ,  $SC_1$ ,  $SC_2$  e  $SC_3$ ; os demais tratamentos apresentam valores moderados de resistência do solo à penetração.

**Tabela 3.** Estatística descritiva da resistência à penetração na superfície do solo para os diferentes tratamentos com soja e milho

Tratamento	Média (MPa)	Variância	DP	CV (%)	Assimetria	Curtose
Soja						
$SD_1$	0,80	0,71	0,84	104,6	1,61	6,44
$SD_2$	0,57	0,46	0,67	117,7	2,23	10,0
$SD_3$	1,33	2,14	1,46	109,5	1,00	2,71
$SE_1$	0,98	1,44	1,20	21,7	1,47	4,21
$SE_2$	2,01	1,75	1,32	65,8	0,43	2,11
$SE_3$	1,10	1,12	1,06	95,7	1,48	4,64
$SC_1$	1,25	1,52	1,23	98,4	1,18	3,56
$SC_2$	1,23	1,42	1,19	96,6	1,52	4,46
$SC_3$	1,73	1,40	1,18	68,5	0,60	2,60
Milho						
$SD_1$	1,29	2,20	1,48	114,6	1,02	2,79
$SD_2$	1,91	1,93	1,39	72,8	0,46	1,99
$SD_3$	1,43	1,78	1,33	92,8	1,22	3,30
$SE_1$	0,97	0,73	0,85	87,9	1,78	6,92
$SE_2$	0,78	0,56	0,75	95,6	1,69	6,08
$SE_3$	1,12	0,81	0,90	80,4	0,80	2,71
$SC_1$	0,68	0,68	0,82	120,4	1,72	5,66
$SC_2$	0,53	0,59	0,77	146,0	2,22	8,11
$SC_3$	0,62	0,32	0,57	91,7	1,03	3,68

DP: Desvio padrão; CV: Coeficiente de variação; Semeadura direta ( $SD_1$ ,  $SD_2$  e  $SD_3$ ); Sistema escarificador ( $SE_1$ ,  $SE_2$  e  $SE_3$ ); Sistema convencional ( $SC_1$ ,  $SC_2$  e  $SC_3$ ).

**Tabela 4.** Semivariograma ajustado para a resistência mecânica da superfície do solo nos diferentes tratamentos estudados

Tratamento	Modelo	$C_0$	$C_1$	a (cm)	RD (%)	$R^2$
Soja						
$SD_1$	Esférico	0,50	1,80	40,00	21,74	0,884
$SD_2$	Esférico	1,00	1,20	40,00	45,45	0,776
$SD_3$	Esférico	0,30	1,80	40,00	14,29	0,931
$SE_1$	Esférico	0,30	0,43	40,00	41,10	0,930
$SE_2$	Esférico	0,20	0,40	20,00	33,33	0,931
$SE_3$	Esférico	0,10	0,80	25,00	11,11	0,990
$SC_1$	Esférico	0,00	0,80	25,00	0,00	0,909
$SC_2$	Exponencial	0,15	0,50	45,00	23,08	0,931
$SC_3$	Esférico	0,05	0,35	30,00	12,50	0,965
Milho						
$SD_1$	Esférico	0,25	0,40	20,00	38,46	0,991
$SD_2$	Esférico	0,25	0,23	50,00	52,08	0,961
$SD_3$	Esférico	0,25	2,25	40,00	10,00	0,995
$SE_1$	Esférico	0,20	1,35	20,00	12,90	0,978
$SE_2$	Exponencial	0,50	1,40	20,00	26,32	0,970
$SE_3$	Esférico	0,30	1,00	25,00	23,08	0,807
$SC_1$	Esférico	0,40	1,30	25,00	23,53	0,884
$SC_2$	Esférico	0,00	1,40	25,00	0,00	0,988
$SC_3$	Esférico	0,40	1,10	30,00	26,67	0,900

$C_0$ : efeito pepita;  $C_1$ : Variância estrutural; a: alcance; RD: Razão de dependência espacial;  $R^2$ : Coeficiente de determinação; Semeadura direta ( $SD_1$ ,  $SD_2$  e  $SD_3$ ); Sistema escarificador ( $SE_1$ ,  $SE_2$  e  $SE_3$ ) e Sistema convencional ( $SC_1$ ,  $SC_2$  e  $SC_3$ ).

Zanão Junior et al. (2007) descrevem que valores de assimetria e curtose próximos de 0, são um indicativo de distribuição de frequência normal. Nesse sentido se percebe que todos os tratamentos e repetições em estudo apresentaram distribuição de frequência lognormal. O fato dos dados não apresentarem distribuição de frequência normal não influencia a análise geoestatística visto que ela se baseia em uma função aleatória contínua (Vieira, 2000; Siqueira et al., 2008).

A grande maioria dos dados foi ajustada ao modelo esférico (Tabela 4) confirmando-o como o que melhor se ajusta aos parâmetros de solo e planta (Cambardella et al., 1994; Bertolani & Vieira, 2001; Grego & Vieira, 2005; Siqueira et al., 2008). Apenas os dados de SC<sub>2</sub> cultivado com soja e SE<sub>2</sub> cultivado com milho se ajustaram ao modelo exponencial. Verifica-se também, na Tabela 4, que os valores de coeficiente de determinação para todos os semivariogramas são elevados, demonstrando a eficácia do modelo ajustado aos pares de semivariância por meio da validação cruzada.

A análise geoestatística demonstra que o preparo convencional apresenta o maior valor de razão de dependência espacial (RD, Tabela 4) entre amostras. A grande maioria dos dados apresentou razão de dependência espacial mediano-alta, não havendo um padrão específico entre os tratamentos com vista à ocorrência de maior ou menor valor de razão de dependência espacial. Este fato descreve como os diferentes sistemas de manejo atuam sobre a variabilidade natural dos atributos do solo (Siqueira et al., 2008; Siqueira et al., 2012).

Os valores de efeito pepita (C<sub>0</sub>) dos dados sinalizam uma baixa descontinuidade espacial entre amostras indicando boa precisão do processo de amostragem. Grego & Vieira (2005) descrevem a resistência à penetração como atributo de ação pontual no solo cujo processo de amostragem requer um número maior de amostras para detectar a variabilidade espacial e obter sua modelagem espacial com maior fiabilidade. Enfim, este fato corrobora com a presença de valores mediano-altos de RD e baixos valores de C<sub>0</sub>.

A média dos valores de alcance é maior para os tratamentos com soja (33,88 cm), enquanto que para os tratamentos com milho este valor está próximo a 28,33 cm. No entanto, pode-se dizer que o tamanho médio das zonas de variabilidade espacial é similar em todos os tratamentos analisados, evento que também pode ser relacionado com a distância entre as linhas de plantio representando, desta maneira, uma compactação maior do solo nessas zonas.

A análise da estrutura do semivariograma experimental (Figura 2 e 3) demonstra, para todos os tratamentos, que existe uma similaridade na distribuição espacial dos pares de semivariância com o aumento da distância. Pode-se dizer que as maiores diferenças entre os semivariogramas do mesmo tratamento são decorrentes da maior ou menor influência da linha de plantio sobre a variabilidade espacial dos dados ou pela manifestação pontual dos valores de resistência à penetração. Ressalta-se que o sistema de semeadura direta apresenta uma homogeneidade estrutural (Kondo & Dias Júnior, 1999;

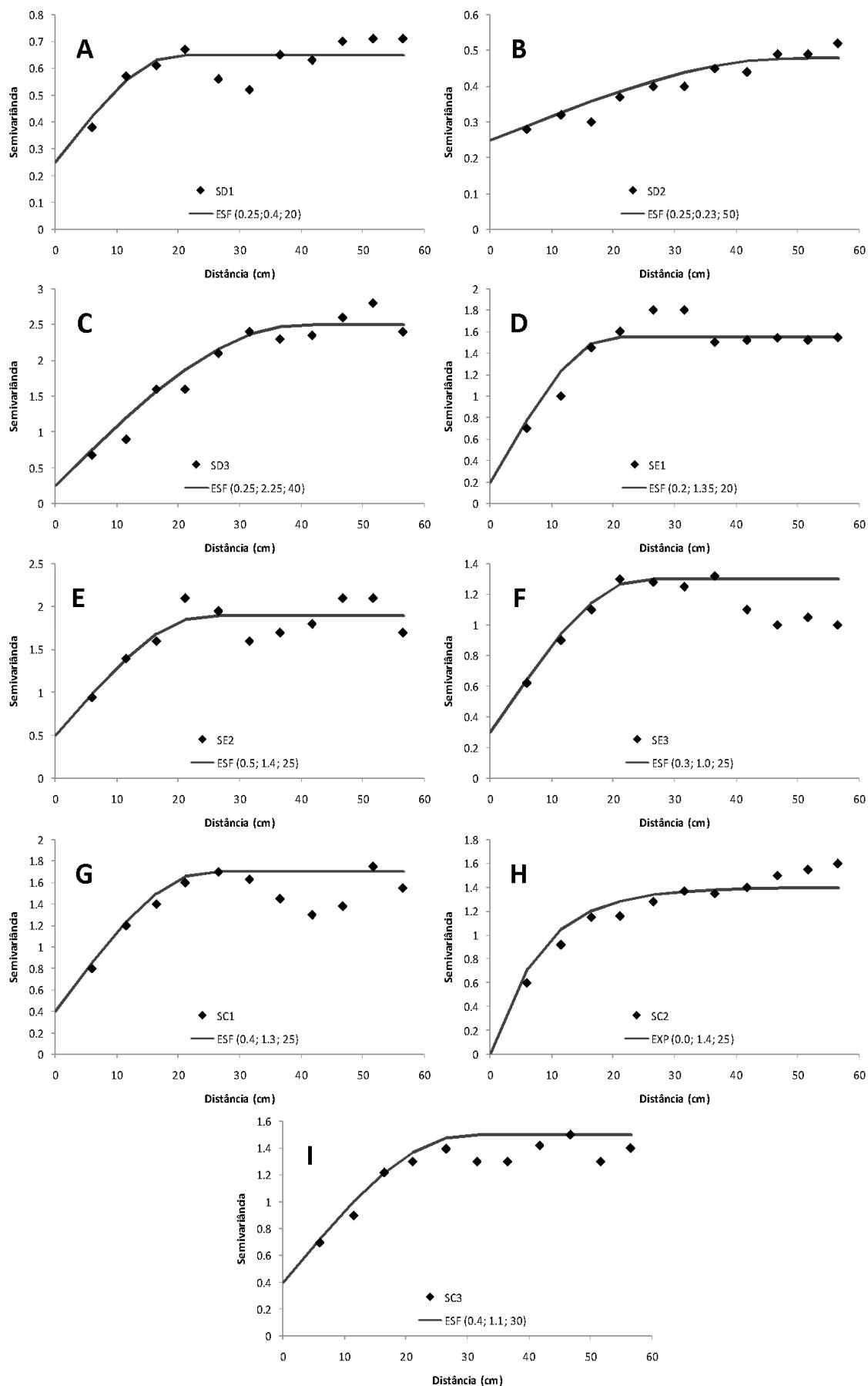
Pikul & Aase, 2003; Silva et al., 2005) quando comparado aos demais sistemas de preparo do solo que promovem degradação da estrutura do solo, por meio das operações de subsolagem e aração (Kondo & Dias Júnior, 1999). Assim, o ajuste do modelo exponencial para SC<sub>2</sub> cultivado com soja e SE<sub>2</sub> cultivado com milho proporcionou a alteração do padrão espacial de variabilidade quando comparado com as demais repetições para o mesmo tratamento os quais se ajustaram ao modelo esférico.

Ressalta-se, que a similaridade entre os semivariogramas ocasionada pela influência da linha de plantio, não proporcionou tendência dos dados de resistência do solo à penetração, conforme constatado pela análise geoestatística inicial dos dados, fato verificado nos semivariogramas apresentados nas Figuras 2 e 3.

Os mapas tridimensionais de variabilidade espacial demonstram a influência do sistema de preparo sobre a resistência à penetração (Figuras 4 e 5). Nota-se que os sistemas de preparo cultivados com soja apresentam mapas tridimensionais muito mais suaves do que o solo cultivado com milho. O sistema de semeadura direta cultivado com soja (SD<sub>1</sub>, SD<sub>2</sub> e SD<sub>3</sub>) apresenta menores valores de resistência à penetração na superfície, principalmente na linha de plantio. O sistema de semeadura direta cultivado com milho demonstra haver grande quantidade de pontos com maior resistência do solo à penetração.

Nos demais sistemas de preparo do solo (SE - preparo escarificador e SC - preparo convencional) os mapas tridimensionais demonstram que a linha de plantio é menos acentuada. Isto se deve porque o sistema de semeadura direta é um sistema conservacionista e, desta forma, ajuda a manter as características naturais do solo (Kondo & Dias Júnior, 1999; Pikul & Aase, 2003; Silva et al., 2005). Por outra parte, o preparo escarificador e o preparo convencional requerem um número maior de operações agrícolas o que, de acordo com Hill & Meza-Montalvo (1990) pode representar um aumento dos valores de densidade e resistência do solo à penetração. Silva et al. (2005) descrevem, estudando o comportamento de atributos físicos do solo em diferentes sistemas de preparo do solo, que o preparo convencional não influenciou a porosidade nem a distribuição do tamanho de poros. De acordo com Senra et al. (2007) no sistema de preparo convencional o uso de máquinas e implementos agrícolas sobre o solo é evidenciado na profundidade de corte, ou seja, em subsuperfície, justificando então o porquê da linha de plantio ser menos acentuada.

Destaca-se que o sistema de semeadura direta propicia, por apresentar uma estabilidade maior dos agregados e continuidade dos poros, maior infiltração da água e menor escoamento superficial (Schick et al., 2000), favorecidos pela manutenção dos resíduos dos cultivos anteriores na superfície do solo, que também contribuem para o aumento do conteúdo de matéria orgânica nesta camada (Silva et al., 2000). Desta maneira, a presença de menores valores de resistência à penetração na superfície do solo medida com penetrômetro de bolso no sistema de semeadura direta, também enseja que maior quantidade de água se infiltre no solo.



**Figura 2.** Semivariogramas ajustados para a resistência do solo à penetração na superfície do solo (MPa) cultivado com soja (semeadura direta: SD<sub>1</sub>, SD<sub>2</sub> e SD<sub>3</sub>; sistema escarificador: SE<sub>1</sub>, SE<sub>2</sub> e SE<sub>3</sub> e sistema convencional: SC<sub>1</sub>, SC<sub>2</sub> e SC<sub>3</sub>)

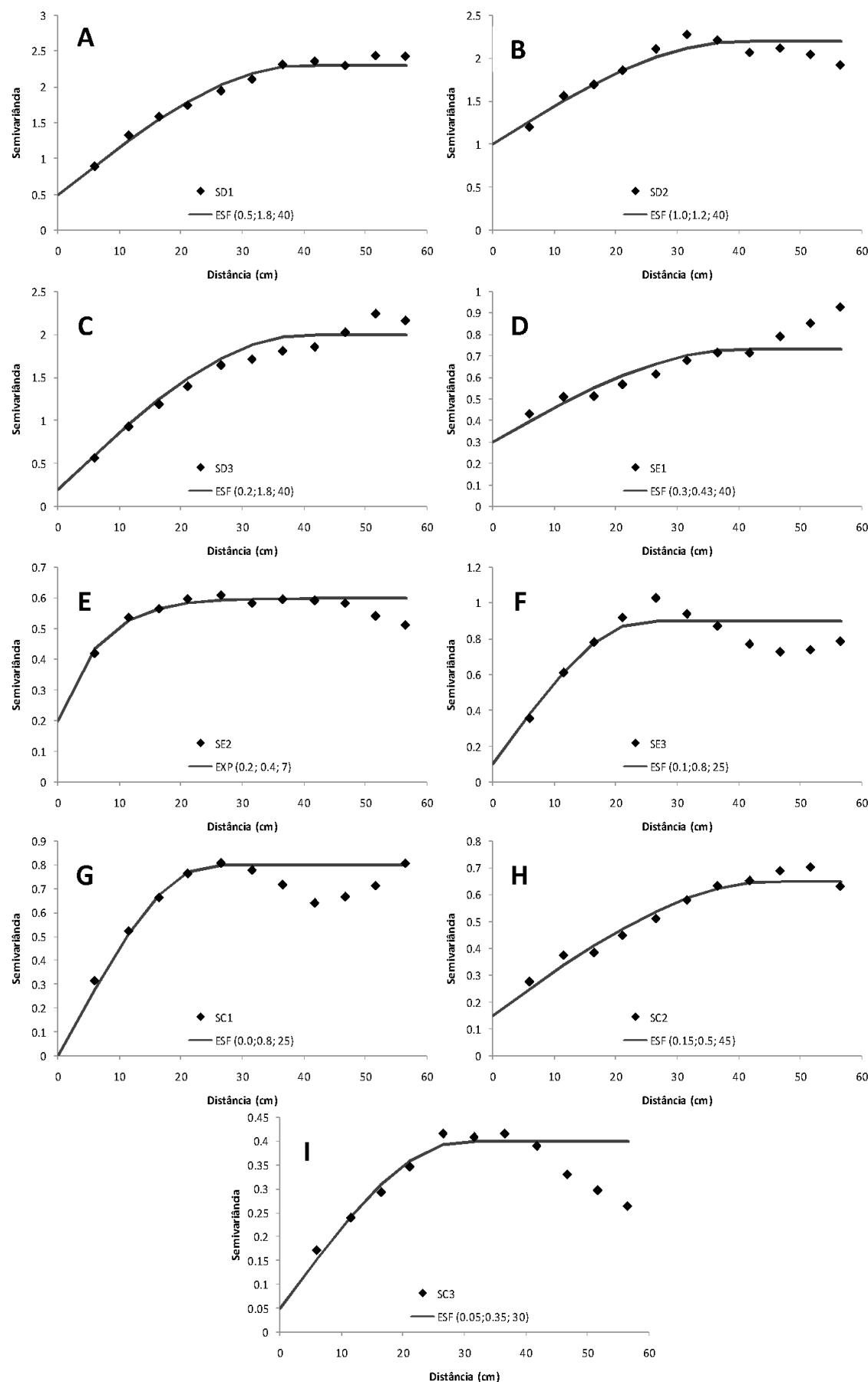


Figura 3. Semivariogramas ajustados para a resistência do solo à penetração na superfície do solo ( $\text{MPa}^2$ ) cultivado com milho (semeadura direta:  $\text{SD}_1$ ,  $\text{SD}_2$  e  $\text{SD}_3$ ; sistema escarificador:  $\text{SE}_1$ ,  $\text{SE}_2$  e  $\text{SE}_3$  e sistema convencional:  $\text{SC}_1$ ,  $\text{SC}_2$  e  $\text{SC}_3$ )

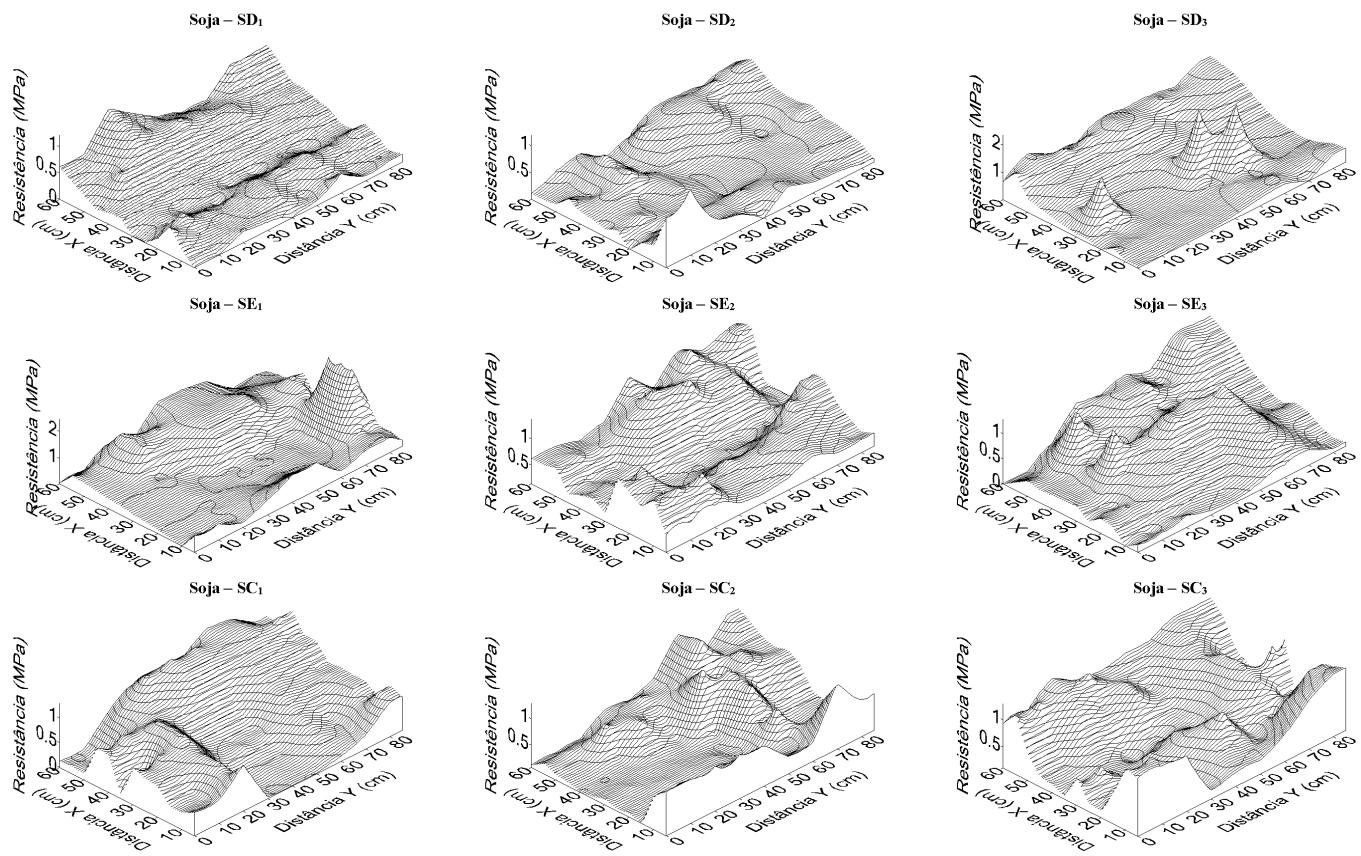


Figura 4. Mapas de variabilidade espacial da resistência à penetração na superfície do solo (MPa) cultivado com soja (semeadura direta: SD<sub>1</sub>, SD<sub>2</sub> e SD<sub>3</sub>; sistema escarificador: SE<sub>1</sub>, SE<sub>2</sub> e SE<sub>3</sub> e sistema convencional: SC<sub>1</sub>, SC<sub>2</sub> e SC<sub>3</sub>)

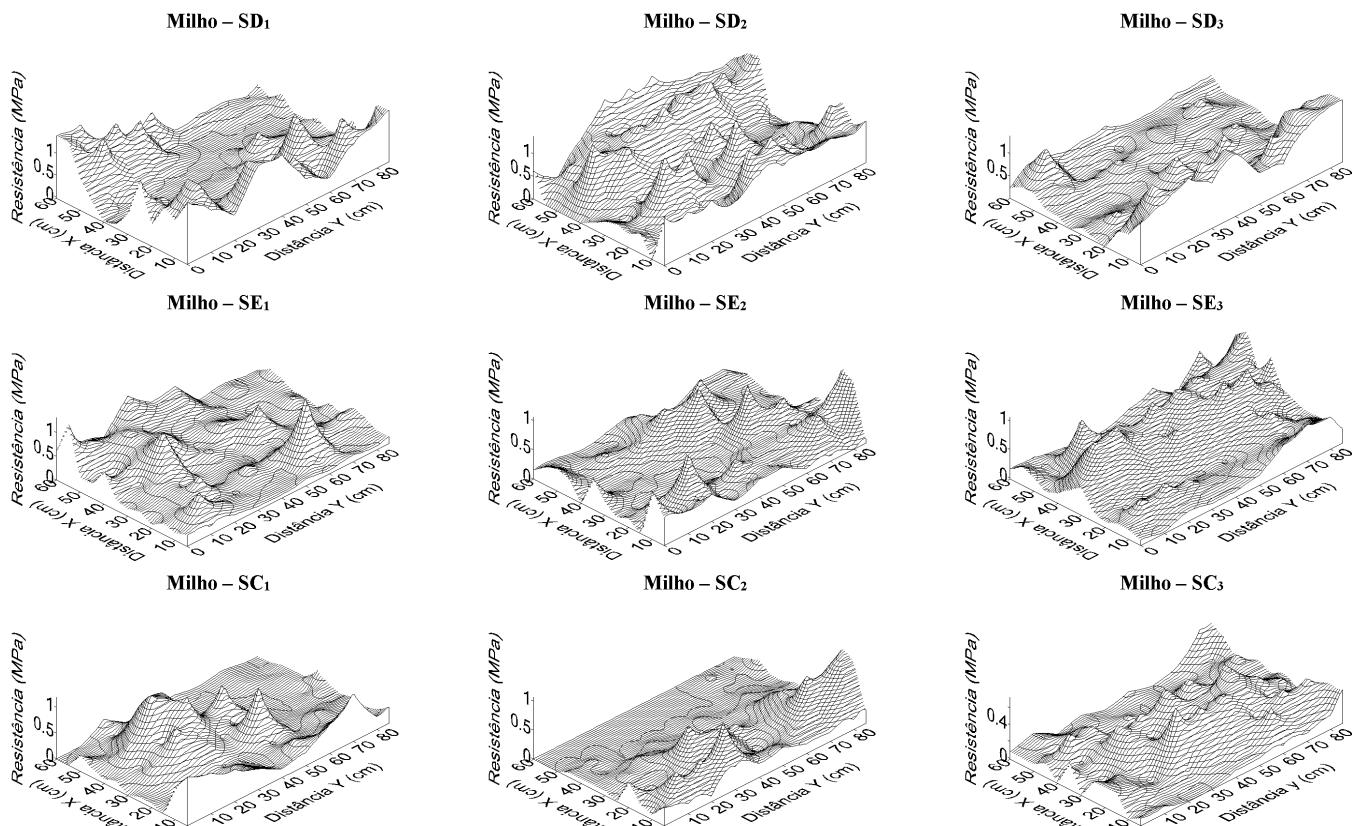


Figura 5. Mapas de variabilidade espacial da resistência à penetração na superfície do solo (MPa) cultivado com milho (semeadura direta: SD<sub>1</sub>, SD<sub>2</sub> e SD<sub>3</sub>; sistema escarificador: SE<sub>1</sub>, SE<sub>2</sub> e SE<sub>3</sub> e sistema convencional: SC<sub>1</sub>, SC<sub>2</sub> e SC<sub>3</sub>)

## Conclusões

A resistência do solo à penetração foi bastante influenciada pela linha da semeadura do que o mesmo sentido do preparo primário do solo.

A resistência à penetração (RP) na superfície do solo apresentou razão de dependência espacial moderada.

## Literatura Citada

- Arshad, M. A.; Lowery, B.; Grossman, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: Doran, J. W.; Jones, A. J. (Eds.). Methods for assessing soil quality. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p.123-141. (SSSA Special Publication, 49).
- Bertolani, F. C.; Vieira, S. R. Variabilidade espacial da taxa de infiltração de água e da espessura do horizonte A, em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes usos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.25, p.987-995, 2001. <<http://sbsc.solos.ufv.br/solos/revistas/v25n4a21.pdf>>. 16 Abr. 2014.
- Beutler, A. N.; Centurion, J. F. Resistência à penetração em Latossolos: valor limitante à produtividade de arroz de sequeiro. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.34, n.6, p.1793-1800, 2004. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782004000600019>>.
- Camargo, O. A.; Alleoni, L. R. F. Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas. Piracicaba: ESALQ, 1997. 132p.
- Camargo, O. A.; Moniz, A. C.; Jorge, J. A.; Valadares, J. M. A. S. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas. Campinas: Instituto Agronômico, 1986. 94p. (Boletim Técnico, 106).
- Cambardella, C. A.; Mooman, T. B.; Novak, J. M.; Parkin, T. B.; Karlem, D. L.; Turvo, R. F.; Konopa, A. E. Field scale variability of soil properties in central Iowa soil. *Soil Science of America Journal*, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994. <<http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>>.
- Corsini, P. C.; Ferraudo, A. S. Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em Latossolo Roxo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.34, n.2, p.289-298, 1999. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X1999000200017>>.
- Costa, F. S.; Albuquerque, J. A.; Bayer, C.; Fontoura, S. M. V.; Wobeto, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.27, n.3, p.527-235, 2003. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832003000300014>>.
- De Maria, I. C.; Castro, O. M.; Souza Dias, H. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.23, n.3, p.703-709, 1999. <<http://sbsc.solos.ufv.br/solos/revistas/v23n3a25.pdf>>. 16 Abr. 2014.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Centro Nacional e Pesquisa em Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília: Embrapa-SPI; Rio de Janeiro: Embrapa-Solos, 2006. 306 p.
- Gomes, F. P.; Garcia, C. H. Estatística aplicada a experimentos agronômicos e florestais. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309p.
- Grego, C. R.; Vieira, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, n.2, p.169-177, 2005. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832005000200002>>.
- Hill, R. L.; Meza-Montalvo, M. Long-term wheel traffic effects on soil physical properties under different tillage systems. *Soil Science Society of America Journal*, v.54, n.3, p.865-870, 1990. <<http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1990.03615995005400030042x>>.
- Imhoff, S.; Silva, A. P.; Tormena, C. A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.35, n.7, p.1493-1500, 2000. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2000000700025>>.
- Kondo, M. K.; Dias Júnior, M. S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.23, n.2, p.211-218, 1999. <<http://sbsc.solos.ufv.br/solos/revistas/v23n2a04.pdf>>. 16 Abr. 2014.
- Pikul Jr., J. L.; Aase, J. K. Water Infiltration and storage affected by subsoiling and subsequent tillage. *Soil Science Society of America Journal*, v.67, n.3, p.859-866, 2003. <<http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2003.0859>>.
- Schick, J.; Bertol, I.; Batistela, O.; Balbinot Junior, A. A. Erosão hídrica em Cambissolo Húmico alumínico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: I- Perdas de solo e água. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.24, n.2, p.427-436, 2000. <<http://sbsc.solos.ufv.br/solos/revistas/v24n2a19.pdf>>. 16 Abr. 2014.
- Senra, A. F.; Louzada, R. O.; Vitorino, A. C. T.; Souza, C. M. A.; Mochi-Victor, D. Resistência à penetração em “Latossolo Vermelho” sob diferentes sistemas de uso e manejo do solo. *Revista Ciências Técnicas Agropecuárias*, v.16, n.1, p.31-36, 2007. <<http://www.redalyc.org/pdf/932/93216108.pdf>>. 17 Abr. 2014
- Silva, M. A. S.; Mafra, A. L.; Albuquerque, J. A.; Bayer, C.; Mielniczuk, J. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. *Ciência Rural*, v.35, n.3, p.544-552, 2005. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782005000300009>>.
- Silva, V. R.; Reinert, D. J.; Reichert, J. M. Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. *Ciência Rural*, v.30, n.5, p.795-801, 2000. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782000000500009>>.
- Siqueira, G. M.; Dafonte Dafonte, J.; Vidal Vázquez, E.; Valcarcel Armesto, M. Distribuição espacial da rugosidade do solo em microparcelas experimentais sob diferentes intensidades de chuva simulada. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.7, n.4, p.671-679, 2012. <<http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v7i4a1783>>.

- Siqueira, G. M.; Vieira, S. R.; Ceddia, M. B. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos. *Bragantia*, v.67, n.1, p.203-211, 2008. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052008000100025>>.
- Tormena, C. A.; Barbosa, M. C.; Costa, A. C. S.; Gonçalves, C. A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. *Scientia Agricola*, v.59, n.4, p.795-801, 2002. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162002000400026>>.
- Vaz, C. M. P.; Primavezi, O.; Patrizzi, V. C.; Iossi, M. F. Influência da umidade na resistência do solo medida com penetrômetro de impacto. São Carlos: Embrapa-CPPSE, 2002, 5p. (Embrapa-CPPSE. Comunicado Técnico, 51).
- Vieira, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: Novais, R. F.; Alvarez, V. H.; Schaefer, G. R. (Eds.) *Tópicos em Ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, 2000. p.1-54.
- Vieira, S. R.; Hatfield, J. L.; Nielsen, D. R.; Biggar, J. W. Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, v.51, n.3, p.1-75. 1983.
- Vieira, S. R.; Millete, J.; Topp, G. C.; Reynolds, W. D. Handbook for geoestatistical analysis of variability in soil and climate data. In: Alvarez, V. V. H.; Schaefer, C. E. G. R.; Barros, N. F.; Mello, J. W. V.; Costa, J. M. (Eds.). *Tópicos em Ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.2, 2002. p.1-45.
- Zanão Junior, L. A.; Lana, R. M. Q.; Guimarães, E. C. Variabilidade espacial do pH, teores de matéria orgânica e micronutrientes em profundidade de amostragem num Latossolo Vermelho sob semeadura direta. *Ciênc. Rural*, v.37, n.4, p.1000-1007, 2007. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782007000400013>>.