

SOLOS E NUTRIÇÃO DE PLANTAS

VARIABILIDADE DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO DETERMINADOS POR MÉTODOS DIVERSOS ⁽¹⁾

GLÉCIO MACHADO SIQUEIRA ^(2*); SIDNEY ROSA VIEIRA ⁽³⁾; MARCOS BACIS CEDDIA ⁽⁴⁾

RESUMO

A variabilidade espacial dos atributos físicos do solo tem sido alvo de diversos estudos nos últimos anos. No entanto, pouco tem sido estudado sobre as diferenças de medidas entre os diversos métodos de amostragem. Desta maneira, este trabalho teve como objetivo analisar a variabilidade espacial de atributos físicos do solo determinados por diferentes métodos de amostragem de um Latossolo Vermelho eutrófico, em Campinas (SP), Brasil, amostrado de janeiro a maio de 2005 em 302 pontos com espaçamento de 10 x 10 metros. A densidade do solo foi determinada por meio do método do anel volumétrico e do método do torrão impermeabilizado. A porosidade total do solo foi medida utilizando-se anéis volumétricos e calculada por meio da densidade de partículas de 2,65 kg dm⁻³ comumente descrita na literatura científica para solos minerais e de 2,84 kg dm⁻³ encontrada na área de estudo. A umidade do solo foi obtida por meio do método volumétrico, do método gravimétrico e pela técnica de reflectometria de domínio do tempo (TDR). A densidade obtida com anéis volumétricos apresentou o menor valor de coeficiente de variação (CV) e de efeito pepita (C₀), respectivamente, de 7,13% e 0,005. A porosidade total medida foi o método mais prático para avaliação deste atributo do solo. A umidade amostrada com anéis volumétricos revelou os valores mais próximos da média quando comparada aos demais métodos de amostragem do conteúdo de água no solo.

Palavras-chave: densidade global, espaço poroso, conteúdo de água, geoestatística.

ABSTRACT

VARIABILITY OF SOIL PHYSICAL ATTRIBUTES DETERMINED BY DIFFERENT METHODS

The spatial variability of soil physical attributes has been the focus of many studies in the last few years. However, little has been discussed of differences of these attributes due to sampling methods. The objective of this study was to analyze the spatial variability of soil physical attributes sampled by different methods in Rhodic Eutrudox, in Campinas (SP, Brazil). Sampling was performed between January and May of 2005, at 302 points of a 10 x 10 m grid. Soil bulk density was measured by the volumetric soil core and the clod methods. Total soil porosity was estimated using the relation between soil bulk density and particle density 2,65 kg dm⁻³ described in scientific literature for mineral soil and 2,84 kg dm⁻³ found in the study area. Soil water content was measured by the volumetric core, gravimetric and TDR methods. Bulk density measured soil core presented the lesser value of coefficient of variation (CV) and effect nugget (C₀), respectively 7,13% and 0,005. The measured total porosity is presented as the method most practical for determination of this attribute of the soil. The humidity sampling volumetric presented results close to the overall average comparative to the too much methods of sampling of the soil water content.

Key words: bulk density, soil porosity, soil water content, geostatistics.

⁽¹⁾ Parte da Dissertação de Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical (IAC) do primeiro autor. Recebido para publicação em 28 de junho de 2006 e aceito em 30 de julho de 2007.

⁽²⁾ Doutorando em Engenharia para o Desenvolvimento Rural, Universidade de Santiago de Compostela (USC), Campus Universitario, 27002 Lugo, Espanha. E-mail: glecio.machado@rai.usc.es. Bolsista MAEC-AECI- (*) Autor correspondente.

⁽³⁾ Instituto Agrônomo (IAC), Caixa Postal 28, 13020-902 Campinas (SP). E-mail: sidney@iac.sp.gov.br

⁽⁴⁾ Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), 23890-000 Seropédica (RJ). E-mail: cedia@ufrrj.br

1. INTRODUÇÃO

Na agricultura de precisão o solo deixa de ser tratado como homogêneo, e a sua variação espacial passa a ser considerada visando à exploração e ao monitoramento de suas características produtivas com vistas a ganhos ótimos, conservação do meio ambiente e desenvolvimento humano. Todavia, a agricultura de precisão utiliza ferramentas computacionais, tecnologias em geoprocessamento, sistema de posicionamento global e ferramentas geoestatísticas para a manipulação e interpretação da variabilidade dos parâmetros envolvidos no processo de produção agrícola.

De acordo com VIEIRA (2004), a variabilidade espacial de solos sempre existiu e deve ser considerada toda vez que a amostragem de campo for efetuada, pois pode indicar locais que necessitam de tratamento diferenciado quanto ao manejo, sem prejuízo para a representatividade, possibilitando maior detalhamento de uma determinada área.

Os atributos físicos do solo têm influência direta no desenvolvimento radicular das culturas e, conseqüentemente, na sua produtividade (SILVA et al. 2000; SIQUEIRA et al. 2006). Desta maneira, a compreensão da variabilidade espacial de atributos físicos do solo coletados por diferentes métodos de amostragem favorece o gerenciamento das informações coletadas em campo para aplicação em agricultura de precisão. Assim, ao se coletar amostras de solo, a variabilidade dos resultados decorre de erros de execução metodológica durante o processo de amostragem e de heterogeneidade do solo em profundidade e no sentido horizontal. Com isso, é difícil separar a contribuição de cada um desses fatores, mas a experiência mostra que se a amostragem for bem feita tomando-se os cuidados sugeridos pela metodologia, a principal fonte de variação é a heterogeneidade do solo (REICHARDT, 1987).

É preciso salientar que uma amostragem bem feita é aquela capaz de representar um fenômeno em estudo. Assim, quanto mais heterogênea for a área, maior deverá ser o número de amostras a serem coletadas, para se atingir uma precisão adequada para a avaliação de determinada variável (SILVEIRA et al., 1999). Por outro lado, a mudança do estado natural (mata nativa) para os cultivos agrícolas tem acrescentado grande fonte de variabilidade aos atributos dos solos, promovendo maior heterogeneidade (BECKETT e WEBSTER, 1971), muitas vezes contrariando o conceito de que quanto mais intensamente cultivado mais homogêneos ficariam esses atributos devido ao seu manejo químico e físico (POCAY, 2000). WEBSTER (1985) ressalta a necessidade de se obter estimativas das propriedades do solo e

planejar pesquisas de forma mais econômica, buscando métodos mais racionais e quantitativos para o estudo das variabilidades intrínsecas dos solos. Atualmente, a pesquisa da ciência do solo tem-se apoiado na geoestatística que, juntamente com a estatística descritiva, tem dado inúmeras respostas às mais variadas questões existentes que, até então, eram ignoradas (CARVALHO et al., 2003).

Tradicionalmente, os experimentos agrícolas utilizam a estatística clássica para planejamento e avaliação dos resultados, baseando-se na independência entre as amostras e em técnicas como a casualização e repetição. A análise dos dados é feita sob a hipótese de independência estatística ou distribuição espacial aleatória, o qual permite o uso de métodos estatísticos como a análise de variância e de parâmetros como o coeficiente de variação. No entanto, em vista da necessidade de repetição, em muitos casos, o número de amostras necessário para um estudo adequado torna-se muito grande, o que é particularmente limitante em estudos de física do solo, que utilizam métodos mais laboriosos e de custo mais elevado, sobretudo na fase de campo. A geoestatística tem sido usada com bastante sucesso em estudos de física do solo, pois se baseia em uma função aleatória contínua estacionária, a qual pode ser submetida a uma grande gama de hipóteses. Na prática, existência de estacionariedade dá a oportunidade de repetir um experimento mesmo que as amostras devam ser coletadas em pontos diferentes, porque todas são consideradas pertencentes à mesma população e com os mesmos momentos estatísticos (VIEIRA, 2000). Por esse motivo, os estudos de variabilidade espacial visam compreender o comportamento espacial de um determinado atributo para a sua utilização em agricultura de precisão, possibilitando que a amostragem seja realizada com o menor número possível de amostras sem apresentar riscos para a representabilidade desse atributo.

Embora a geoestatística contribua muito no planejamento e entendimento da variabilidade espacial do fenômeno, os erros inerentes aos diversos métodos de caracterização de um atributo têm um papel bastante importante na variabilidade dos dados. Diante da importância que a coleta de dados possui, é necessário compreender como os diferentes métodos de amostragem interferem e disponibilizam os resultados, visando à melhoria dos trabalhos de campo e laboratório, assim como os ganhos com a produção e sua aplicação em agricultura de precisão. Desta maneira, este trabalho teve como objetivo analisar a variabilidade espacial de atributos físicos do solo determinados por diferentes métodos de amostragem de um Latossolo Vermelho eutrófico, em Campinas (SP).

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido em uma área de 3,42 hectares sob o sistema de plantio direto há mais de vinte anos, no Centro Experimental do Instituto Agronômico (IAC), em Campinas (SP). O solo da área é um Latossolo Vermelho eutroférrico (EMBRAPA, 1999), com cerca de 6,5% de declividade, altitude média de 600 m e com as seguintes coordenadas geográficas: latitude 22° 53' Sul e longitude 47° 04' Oeste.

No período da amostragem, o solo estava sendo cultivado com a cultura da mamona (*Ricinus communis*) cultivar IAC-Guarani, plantada em 27 de novembro de 2004, com densidade de 10.000 plantas por hectare. A área foi dividida em uma grade de 10 x 10 metros, gerando um total de 302 pontos de amostragem, de acordo com figura 1.

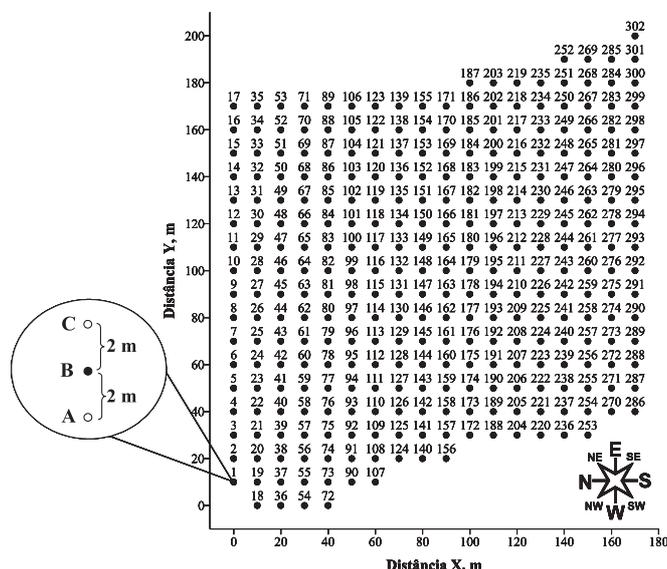


Figura 1. Grade de amostras na área de estudo, contendo 302 pontos de amostragem com espaçamento regular de 10 x 10 metros e o esquema de amostragem com três repetições utilizado para a coleta da umidade do solo em cada um dos pontos.

As amostras de solo foram coletadas de janeiro a maio de 2005, na camada de 0,0–0,10 m, para determinação dos seguintes atributos: densidade (kg dm^{-3}), porosidade total (%) e umidade volumétrica do solo (%).

A densidade do solo foi determinada por meio do método do anel volumétrico (D_s -Anel) e pelo método do torrão impermeabilizado com diferentes tamanhos de torrões: 3 cm (D_{s3}), 5 cm (D_{s5}) e 7 cm (D_{s7}), e analisados respectivamente de acordo com método descrito por CAMARGO et al. (1986) e BLAKE e HARTGE (1986). Os torrões foram coletados ao longo

da grade de amostragem e mergulhados em parafina fundida para sua impermeabilização. A porosidade total medida (PT) foi avaliada de acordo com CAMARGO et al. (1986) com amostras indeformadas de solo, saturadas por 48 horas em bandeja com água até dois terços da altura do anel. A porosidade total calculada foi determinada com a densidade de partículas de $2,65 \text{ kg dm}^{-3}$ (PT-2,65), comumente recomendada para os solos minerais (REICHARDT, 1987) e com a densidade de partículas de $2,84 \text{ kg dm}^{-3}$ (PT-2,84) observada na área de estudo e determinada conforme CAMARGO et al. (1986).

A umidade do solo foi determinada utilizando-se diferentes métodos para a sua determinação. Foram coletadas amostras de solo com anéis volumétricos de 100 cm^3 que favoreceu a análise do conteúdo volumétrico de água no solo, conforme descrito por CAMARGO et al. (1986). Amostras deformadas de solo foram coletadas com três repetições para determinação da umidade por meio do gravimétrico (CAMARGO et al. 1986) com três repetições (U-A, U-B e U-C). A amostra "A" foi retirada a dois metros do ponto de amostragem (Figura 1), a amostra "B" extraída exatamente no ponto de amostragem e a amostra "C", a dois metros acima do ponto de amostragem. Posteriormente, a umidade gravimétrica foi transformada em umidade volumétrica utilizando-se os valores de densidade do solo, de acordo com CAMARGO et al. (1986).

A técnica de reflectometria de domínio do tempo (TDR) foi utilizada para se determinar a umidade volumétrica do solo com duas repetições (U-TDR09 e U-TDR11), por meio da relação entre a umidade e capacidade dielétrica de um solo mineral conforme equação empírica descrita por TOPP et al. (1980) (Equação 1).

$$\theta = -5,310^{-2} + 2,9210^{-2}\epsilon_b - 5,510^{-4}\epsilon_b^2 + 4,310^{-6}\epsilon_b^3 \quad (1)$$

Em que: θ é a umidade do solo expresso em $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$; e ϵ_b é a constante dielétrica (dimensional) do meio poroso, que engloba sólidos, água e ar. O aparelho TDR utilizado durante a aferição da umidade do solo foi o Modelo HydroSense da Campbell Scientific Ltd..

Os dados foram analisados no pacote de programas GEOEST (VIEIRA et al., 2002), que fornece os principais parâmetros estatísticos (DP-Desvio-padrão; CV-Coeficiente de variação; Min-Valor mínimo; Max-Valor máximo e D-Desvio máximo em relação à distribuição normal) e geoestatísticos. O semivariograma experimental foi utilizado para determinar a variabilidade e a dependência espacial entre as amostras, representando quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado, sendo então expresso por meio da Equação 2:

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

Em que a semivariância é estimada a partir de $\gamma^*(h)$ e $N(h)$ representa o número de pares de valores medidos $Z(x_i)$, $Z(x_i + h)$ separadas por um vetor (h) . Desta forma, a dependência espacial manifesta-se como uma correlação entre as amostras que diminui a medida que a distância entre os pontos amostrais aumenta e desaparece completamente quando a distância entre os pontos é suficientemente grande, os quais, neste caso, são considerados estatisticamente independentes (VIEIRA, 2000). Assim, o gráfico do semivariograma é composto por uma série de valores (efeito pepita, variância estrutural e alcance), aos quais é preciso adequar um modelo matemático. O efeito pepita (C_0) indica a descontinuidade entre as amostras ou seja, a variabilidade espacial não detectada durante o processo de amostragem do solo. A variância estrutural (C_1) é como um componente do semivariograma que indica o ponto onde a correlação entre as amostras se estabiliza. O alcance (a) representa o tamanho das manchas de variabilidade espacial para um determinado atributo; a partir deste ponto não existe mais correlação entre as amostras.

Todos os atributos físicos do solo envolvidos neste estudo se ajustaram ao modelo esférico. De acordo com a Equação 3, o modelo esférico é descrito inicialmente como linear (aproximadamente $1/3$ do alcance - $0 < h < a$) e em seguida apresentando uma parte pendente ($2/3$ do alcance - $h > a$).

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad 0 < h < a \quad (3)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \quad h > a$$

Uma vez ajustado um modelo matemático ao semivariograma, utilizou-se a técnica de *krigagem* para realizar a interpolação dos dados para os locais não amostrados sem tendência e com variância mínima (VIEIRA, 2000; CARVALHO e ASSAD, 2005; GREGO e VIEIRA, 2005). A utilização da técnica de *krigagem* (Equação 4) utiliza a dependência espacial entre amostras vizinhas, expressa no semivariograma para estimar valores em qualquer posição dentro do campo (VIEIRA, 2000).

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

O software SURFER 7.0 (GOLDEN SOFTWARE, 1999) foi então utilizado para construção de mapas de isolinhas para os diferentes atributos envolvidos neste estudo, utilizando os valores estimados por meio da técnica de *krigagem* para os locais não amostrados (VIEIRA e PAZ GONZÁLEZ, 2003). Desta maneira, as isolinhas são determinadas pelo *software*

SURFER 7.0 com base em um algoritmo linear e não tendencioso expresso por meio da técnica de *krigagem*, conforme descrito por LANDIM (2000) e CARVALHO e ASSAD (2005).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 1 estão inseridos os principais momentos estatísticos para os atributos envolvidos neste estudo. O coeficiente de variação (CV) fornece uma medida da precisão de um experimento, possibilitando, então, verificar a acurácia dos diferentes métodos de amostragem de atributos físicos do solo. Para a densidade do solo, percebe-se que o melhor valor de coeficiente de variação é atribuído para Ds-Anel (7,13%). Nota-se que a porosidade total do solo, determinada com densidade de partículas de $2,84 \text{ kg dm}^{-3}$ (PT-2,84), foi a que melhor representou este atributo por ter o menor valor de coeficiente de variação (4,70%). Dentre os diferentes métodos utilizados para se determinar a umidade do solo, o método volumétrico (U-Anel) foi o de menor valor de coeficiente de variação (12,51%). Esse fato também é confirmado por meio dos menores valores de variância apresentados para esses atributos, com exceção daqueles relacionados com a umidade do solo, cujo menor valor de variância foi descrito para U-TDR09. Este atributo, porém, apresenta coeficiente de variação (17,64%) maior que U-Anel (12,51%).

Dentre os atributos envolvidos neste estudo os únicos com distribuição normal para o conjunto de dados foram: Ds-Anel, PT, PT-2,65, PT-2,84 e U-Anel. Neste caso, o conjunto de dados revela seus valores amostrais próximos da média, não havendo tendência de distribuição de valores em determinada direção para a área de estudo, ou seja, existe uma homogeneidade entre os valores das amostras.

Na tabela 2, observam-se os parâmetros de ajuste do semivariograma para os atributos envolvidos neste estudo. Todos os atributos analisados se ajustaram ao modelo esférico (ESF), concordando com vários outros resultados que indicam ser este modelo o que mais se ajusta aos atributos do solo (TRANGMAR et al., 1985; BERTOLANI e VIEIRA, 2001; SOUZA et al., 2004).

O grau de dependência espacial é classificado de acordo com ZIMBACK (2001) em baixo (0,0-25,00%), médio (25,00 - 75,00%) e alto ($> 75,00\%$). Para o presente estudo, as amostras representam grau de dependência baixo (Ds-Anel, D_{s5}, D_{s7}, PT, PT-2,65, PT-2,84 e U-C,) e médio (D_{s3}, U-Anel, U-A, U-TDR09 e U-TDR11). No geral, o grau de dependência descrito para os atributos envolvidos neste estudo indica baixa aleatoriedade entre as amostras.

Tabela 1. Parâmetros estatísticos para os diferentes atributos envolvidos neste estudo (densidade, porosidade total e umidade do solo)

Atributo	Média	Variância	DP	CV	Mín.	Max.	Assimetria	Curtose	D
				%					
Ds-Anel	1,128	0,006	0,08	7,13	0,857	1,362	0,070	0,333	0,04**n
D _{s3}	1,627	0,013	0,36	22,70	1,000	3,000	1,000	1,000	0,14*Ln
D _{s5}	1,369	0,023	0,15	11,18	1,023	2,000	0,532	1,000	0,05**Ln
D _{s7}	1,394	0,028	0,16	12,11	1,004	1,980	0,443	0,785	0,06*Ln
PT	59,603	18,291	4,27	7,18	42,37	75,77	-0,186	1,743	0,04**n
PT-2,65	57,411	9,220	3,03	5,29	48,62	67,65	-0,070	0,328	0,04**n
PT-2,84	60,260	8,031	2,83	4,70	52,06	69,81	-0,070	0,327	0,04**n
U-Anel	41,505	26,970	5,19	12,51	27,59	60,52	0,256	0,700	0,03**n
U-A	32,655	35,169	5,93	18,16	15,95	68,04	1,945	7,007	0,16*Ln
U-B	31,636	60,540	7,78	24,59	13,74	68,27	1,174	3,222	0,14*Ln
U-C	31,744	53,192	7,29	22,97	8,00	62,84	0,849	4,617	0,17*Ln
U-TDR09	12,102	4,557	2,13	17,64	7,00	21,00	0,479	0,845	0,13*Ln
U-TDR11	11,459	5,713	17,64	20,86	7,00	20,00	0,903	1,276	0,15*Ln

n: Dados que apresentam distribuição normal. Ln: Dados que apresentam distribuição Lognormal. * Probabilidade de erro de 1% pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. ** Probabilidade de erro de 5% pelo teste de Kolmogorov-Smirnov.

Tabela 2. Parâmetros de ajuste do semivariograma para os diferentes atributos envolvidos neste estudo (densidade, porosidade total e umidade do solo)

Atributo	Modelo	C ₀	C ₁	a	R ²	SQDP	GD
Ds-Anel	Esférico	0,005	0,001	65,00	0,476	4x10 ⁻⁶	21,93
D _{s3}	Esférico	0,166	0,028	50,00	0,259	3x10 ⁻⁵	26,93
D _{s5}	Esférico	0,019	0,004	65,00	0,251	1x10 ⁻⁶	20,50
D _{s7}	Esférico	0,024	0,003	46,00	0,286	9x10 ⁻⁷	15,78
PT	Esférico	13,580	3,920	85,00	0,661	0,463	22,4
PT-2,65	Esférico	8,000	1,430	60,00	0,242	0,219	15,16
PT-2,84	Esférico	6,600	1,550	37,00	0,172	0,178	19,01
U-Anel	Esférico	12,500	4,400	56,00	0,539	0,406	26,03
U-A	Esférico	27,000	11,200	48,00	0,334	3,881	29,31
U-B	*	*	*	*	*	*	*
U-C	Esférico	44,000	13,000	46,00	0,266	8,433	22,80
U-TDR09	Esférico	2,400	1,930	28,00	0,487	0,027	44,57
U-TDR11	Esférico	3,400	2,000	35,00	0,459	0,049	37,03

R²: Coeficiente de correlação. SQDP: Soma de quadrados de desvios ponderados. GD: Grau de dependência (%). * Efeito pepita puro, não permitindo ajuste.

O efeito pepita (C₀) indica a descontinuidade de um fenômeno. Portanto, quanto maior o valor do efeito pepita maior a variabilidade não detectada pelo processo de amostragem. Desta maneira, é possível fazer uma analogia entre os valores de coeficiente de variação (CV) e de efeito pepita (C₀). Percebe-se que

os atributos que representam valores de coeficiente de variação mais elevados também indicam maior descontinuidade entre as amostras. Assim, os métodos com maior acurácia descrita por meio do coeficiente de variação (Ds-Anel, PT-2,84, U-Anel) também possuem menores valores de efeito pepita.

Com respeito aos dados de umidade do solo, verifica-se na tabela 1 que U-TDR09 possui efeito pepita menor que U-Anel. Contudo, o coeficiente de variação para U-Anel é mais baixo, indicando maior homogeneidade entre as amostras. Por isso, U-Anel é considerado o melhor método para determinação da umidade do solo. Por outro lado, nota-se também que as maiores variações nos parâmetros estatísticos e geoestatísticos para a umidade do solo, determinadas por diferentes métodos, podem estar relacionadas com a grande instabilidade deste atributo no campo, uma vez que pequenas variações de solo e atmosfera podem interferir nos resultados.

Verifica-se na tabela 2 que o maior valor de alcance (a) é descrito para PT (porosidade total medida) com 85 m de tamanho médio das manchas de variabilidade, indicando, neste caso, que o espaçamento entre as amostras poderia ser aumentado. Comparando-se, porém, os valores de efeito pepita (C_0) e de variância estrutural (C_1) de PT, PT-2,65 e PT-2,84 verifica-se que apesar de PT revelar o maior valor de alcance, seus valores de efeito pepita (C_0) e de variância estrutural (C_1) são mais elevados indicando maior descontinuidade entre as amostras. Desta forma, é preciso considerar a interação entre os parâmetros de ajuste do semivariograma para se determinar a melhor representação da variabilidade espacial de um fenômeno qualquer expresso por meio do semivariograma.

Para os dados relativos à densidade do solo, a melhor interação entre os parâmetros de ajuste do semivariograma é descrita para $D_{s\text{-Anel}}$ e D_{s5} , uma vez que esses dados representam a menor descontinuidade entre amostras para os dois métodos de amostragem da densidade do solo e os maiores valores de alcance (a) de 65 m para ambas as amostragens.

Todavia, a densidade do solo obtida pelo método do anel volumétrico representa melhor este fenômeno, em função do maior volume de solo utilizado para a sua determinação. Outros autores que trabalharam com a densidade do solo avaliada por meio do método do torrão impermeabilizado descrevem valores mais elevados de densidade por meio deste método, em função do tamanho diminuto da amostra (BLAKE e HARTGE, 1986; JACCOUD, 1971; TISDALL, 1951; SILVA et al., 2000). Esse fato pode ser visualizado na figura 2 que representa os mapas de isolinhas para a densidade do solo determinada por diferentes métodos de amostragem. BLAKE e HARTGE (1986) e SILVA et al. (2000) descrevem ainda que o fato de o método do torrão indicar valores mais elevados de densidade do solo pode estar associado à penetração de parafina em macroporos e fendas existentes no torrão, ou à perda de macroporos e segregação no momento da coleta dos torrões acarretando maiores valores de densidade.

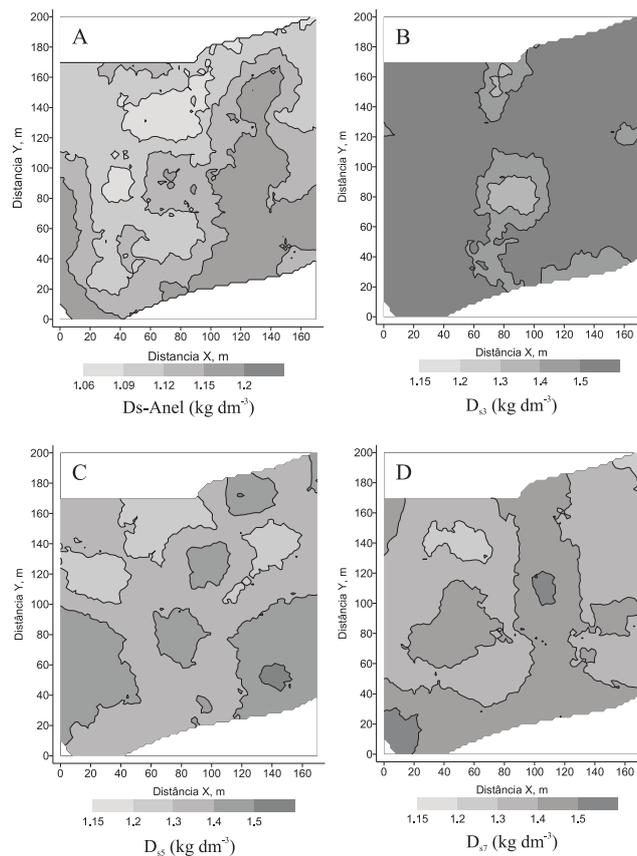


Figura 2. Mapas de isolinhas para a densidade do solo: A. Densidade com anel volumétrico ($D_{s\text{-Anel}}$); B. Densidade com do torrão de 3 cm (D_{s3}); C. Densidade com torrão de 5 cm (D_{s5}) e D. Densidade com torrão de 7 cm (D_{s7}).

Percebe-se na figura 2 que para o método do torrão impermeabilizado, há uma diminuição das estimativas de densidade do solo com o aumento do torrão. Deste modo, é possível visualizar nos mapas de isolinhas para a densidade do solo que em D_{s5} e D_{s7} existe uma tendência de similaridade entre esses mapas e o mapa de $D_{s\text{-Anel}}$.

Por outro lado, FOLEGATTI et al. (2001), estudando as diferenças entre os valores de densidade do solo obtidos pelo método do anel, descrevem que este método pode influenciar os resultados tanto em solos arenosos quanto em solos argilosos. Este fato pode ser justificado como consequência de erros metodológicos durante o processo de amostragem. Contudo, se os anéis forem cravados no solo respeitando-se a metodologia, os erros metodológicos são considerados incipientes ou mesmo nulos.

Para a porosidade total do solo era esperado que os melhores resultados fossem expressos por PT por ser um método direto para determinação deste

atributo do solo. No entanto, PT-2,84 foi o método que melhor caracterizou o fenômeno da porosidade para a área de estudo. Contudo, PT-2,84 é uma maneira indireta de se expressar a porosidade total do solo. Portanto, para sua obtenção é necessário o conhecimento da densidade do solo e da densidade de partículas do solo da área em estudo. Este fato representa um aumento do número de amostras e, conseqüentemente, dos custos de análise laboratorial. Assim, podemos reconsiderar o fato de PT-2,84 ser o melhor método de amostragem para representar a porosidade total do solo.

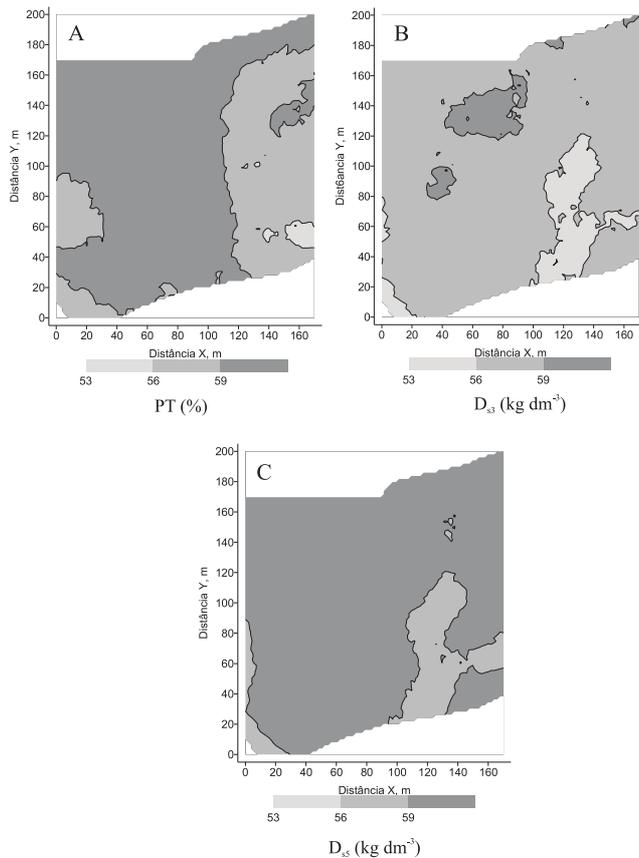


Figura 3. Mapa de isolinhas para a porosidade total do solo: A. Porosidade total pelo método volumétrico (PT); B. Porosidade total calculada pela densidade de partículas de $2,65 \text{ kg dm}^{-3}$ (PT-2,65); C. Porosidade total calculada com densidade de partículas de $2,84 \text{ kg dm}^{-3}$ (PT-2,84).

Pela análise da figura 3, observa-se que os mapas de isolinhas para a porosidade do solo são muito diferentes, havendo ligeira similaridade entre PT e PT-2,84. Para PT-2,65 verifica-se que em grande parte da área a porosidade total atinge valores entre 56% e 59%, enquanto para PT e PT-2,84, a maior parte da área assume valores acima de 59%. Pode-se justificar essa diferença entre mapas de porosidade

do solo pelo fato de que em PT-2,65 calcula-se a porosidade total utilizando um valor médio de densidade de partículas de $2,65 \text{ kg dm}^{-3}$, comumente citado na literatura (REICHARDT, 1987 e REICHARDT e TIMM, 2004), considerando que o solo seja mineral e constituído principalmente por quartzo e feldspato, fato que não ocorre na área de estudo.

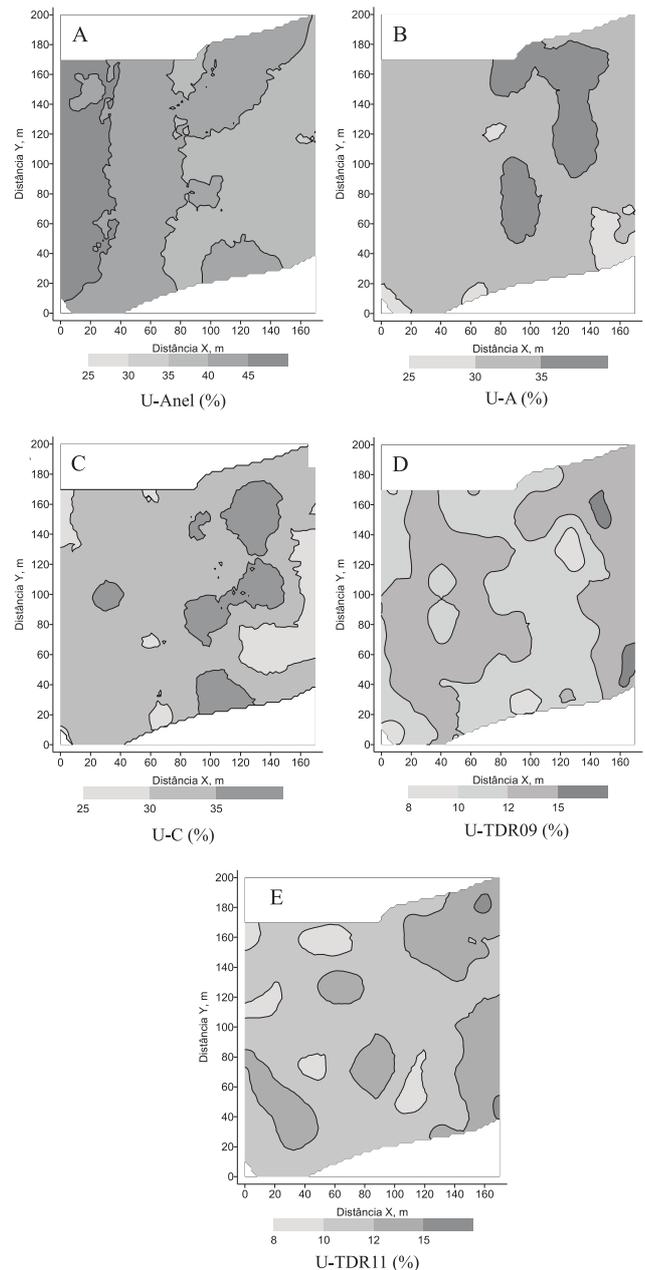


Figura 4. Mapa de isolinhas para a umidade do solo: A. Umidade pelo método volumétrico (U-Anel); B. Umidade gravimétrica no ponto A (U-A); C. Umidade gravimétrica no ponto C (U-C); D. Umidade obtida com TDR no dia 09/05/2005 (U-TDR09); E. Umidade obtida com TDR no dia 11/05/2005 (U-TDR11).

Pode-se descrever que em cada um dos métodos utilizados para se determinar a porosidade total do solo observou-se valor distinto de porosidade, permitindo que a correlação entre amostras seja diferente para cada um deles. Esse fato é demonstrado pelos diferentes valores de ajuste do semivariograma de PT, PT-2,65 e PT-2,84, explicando, assim, as maiores diferenças entre os mapas de isolinhas para a porosidade do solo.

No caso da umidade do solo, é preciso considerar que a primeira amostragem (U-Anel) representa os maiores teores de água no solo chegando a 45%. Por sua vez, os teores de água nas demais amostragens são menores, conforme pode ser verificado nos valores médios de água no solo (Tabela 1) e nos mapas de isolinhas (Figura 4) para as diferentes datas de amostragem. Deste modo, é possível descrever que quanto maior os valores de água no solo menor a descontinuidade entre amostras descrita pelo efeito pepita (C_0) e maior o tamanho das manchas de variabilidade indicados pelos valores de alcance (a).

No entanto, a umidade obtida com TDR em 9/5/2005 e 11/5/2005 indicam valores de coeficiente de variação e variância consideravelmente baixos, podendo-se então considerar os seus valores de alcance para representar a área (28 m e 35 m). O TDR permite leituras automatizadas em tempo real, sendo um equipamento de fácil manuseio, porém seu custo é alto e há necessidade de calibração para cada tipo de solo (CICHOTA e VAN LIER, 2004).

De maneira geral, as maiores diferenças entre os resultados expressos pelos diferentes métodos para obtenção da umidade do solo são decorrentes principalmente do teor de umidade do solo, que influencia a manifestação da variabilidade espacial deste atributo obtido por métodos diversos. TIMM et al. (2006), estudando o comportamento da umidade e da densidade do solo ao longo do tempo, descrevem que não há diferença no padrão de variabilidade espacial da umidade nos momentos em que o solo está mais úmido. Por outro lado, vale a pena ressaltar que a própria heterogeneidade dos atributos do solo ao longo da superfície da área de estudo também pode estar influenciando os resultados de umidade coletada em diferentes datas e por diferentes métodos de amostragem.

CONCLUSÕES

1. A densidade do solo coletada com anéis volumétricos foi a que melhor representou este atributo para a área de estudo, apresentando os melhores valores de coeficiente de variação (7,13%) e de efeito pepita (0,005).

2. O método para determinação da porosidade total (PT) com anéis volumétricos é capaz de mensurar este atributo com simplicidade e praticidade, quando comparado com o método para avaliação da porosidade total calculada (PT-2,65 e PT-2,84).

3. A umidade amostrada com anéis volumétricos indicou os valores mais próximos da média quando comparada aos demais métodos, em que se verifica aumento da variabilidade, em vista da diminuição do conteúdo de água no solo para os demais métodos de amostragem.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Apoio à Pesquisa Agrícola (FUNDAG) pela concessão de bolsa de mestrado para o primeiro autor e pelo financiamento parcial deste trabalho. Ao Ministério de Educação e Ciência da Espanha (Projeto CGL2005-08219-C02-02), a Xunta de Galícia (Projeto PGIDIT06PXIC291062PN) e ao Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) pelo financiamento parcial deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- BECKETT, P.H.T.; WEBSTER, R. Soil variability: a review. **Soil Fertility**, v.31, p.1-15, 1971.
- BERTOLANI, F.C.; VIEIRA, S.R. Variabilidade especial 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.
- BLAKE, G.R.; HARTGE, K. H. Bulk Density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: Physical and Mineralogical Methods**. Part 1. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 363-375.
- 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 Agrônomo de Campinas**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1986. 94p. (Boletim Técnico nº 106)
- CARVALHO, J.R.P.; ASSAD, E.D. Análise da precipitação pluviométrica no Estado de São Paulo: comparação de métodos de interpolação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.2, p.377-384, 2005.
- CARVALHO, M.P.; TAKEDA, E.Y.; FREDDI, O.S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.695-703, 2003.
- CICHOTA, R.; van LIER, Q.J. Avaliação o campo de um TDR segmentado para estimativa da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.78, n.1, p.72-78, 2004.

- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, Embrapa Produção de Informação, 1999. 412 p.
- FOLEGATTI, M.V.; BRASIL, R.P.C.; BLANCO, F.F. Sampling equipment for soil bulk density determination tested in a Kandiuudalfic Eutradox and a Typic Hapludox. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.58, n.4, p.833-838, 2001.
- GOLDEN SOFTWARE. **Surfer: User's Guide (Versión 7.0)**. Golden, CO, EEUU, 1999. 679 p.
- GREGO, C.R.; VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, p.169-177, 2005.
- JACCOUD, A. **Curvas características de umidade dos solos da área da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro**. 1971. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro-UFRRJ, Rio de Janeiro.
- LANDIM, P.M.B. **Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas**. Rio Claro: UNESP, 2000. 20 p. Disponível no formato PDF (Adobe Acrobat®) em <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>> (Texto Didático 02)
- POCAY, V.G. **Relações entre pedofoma e variabilidade espacial de atributos de Latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar**. 2000. 177p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias-UNESP, Jaboticabal.
- REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2004. 478p.
- REICHARDT, K. **A água nos sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987, 188p.
- SILVA, R.S.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Comparação entre os métodos do cilindro e do torrão na determinação da porosidade e da densidade do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.30, n.6, p.1065-1068, 2000.
- SILVEIRA, P.M.; ZIMMERMANN, F.J.P.; SILVA, S.C. Amostragem e variabilidade espacial da produtividade do feijoeiro em uma área experimental submetida a diferentes sistemas de preparo do solo. In: RENAF - Reunião Nacional de Pesquisa de Feijão, 6, 1999, Salvador. **Anais...** Salvador, 1999. p. 613-616.
- SIQUEIRA, G.M.; MIGUEL, F.R.M.; GREGO, C.R.; XAVIER, M.A.; VASCONCELOS, A.C.M.; VIEIRA, S.R. Compactación del suelo y desarrollo de raíces de caña de azúcar (*saccharum officinarum* l.). In: CONGRESO ARGENTINO DE LA CIENCIA DEL SUELO, 20., 2006, Salta-Jujuy. **Anais...** Salta-Jujuy: Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo, 2006. CD-ROM.
- SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p.937-944, 2004.
- TIMM, L.C.; PIRES, L.F.; ROVERATTI, R.; ARTHUR, R.C.J.; REICHARDT, K.; OLIVEIRA, J.C.M.; BACCHI, O.O.S. Field spatial and temporal patterns of soil water content and bulk density changes. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.63, n.1, p.55-64, 2006.
- TISDALL, A.L. Comparison of methods of determining apparent density of soils. **Australian Journal Agronomy Research**, Collingwood, v.2, p.349-354, 1951.
- TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. Eletromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, Washington, v.16, p.574-582, 1980.
- TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, Amsterdam, v 38, p. 45-93, 1985.
- VIEIRA, S.R. **Análise da variabilidade espacial e temporal de umidade do solo em um Latossolo Vermelho eutroférico em Campinas, São Paulo**. Campinas, 2004. 57f. (Relatório FAPESP 02/02863-3)
- VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F., ALVAREZ, V.H., SCHAEFER, G.R. (Ed.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, 2000. p. 1-54.
- VIEIRA, S.R.; MILLETE, J.; TOPP, G.C.; REYNOLDS, W.D. Handbook for geostatistical 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. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.2, 2002. p.1-45.
- VIEIRA, S.R.; PAZ GONZÁLEZ, A. Analysis of the spatial variability of crop yield and soil properties in small agricultural plots. **Bragantia**, Campinas, v.62, n.1, p.127-138, 2003.
- WEBSTER, R. **Quantitative spatial analysis of soil in the field**. Advances in Soil Science, New York, p. 1-70, 1985.
- ZIMBACK, C.R.L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo**. 2001. 114f. Tese (Tese de Livre Docência) - Faculdade de Ciências Agrônomicas-UNESP, Botucatu.