

## VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM SOLO SOB SISTEMA DE PLANTIO DIRETO

### SPATIAL VARIABILITY OF PHYSICAL ATTRIBUTES OF A SOIL UNDER NO-TILLAGE SYSTEM

**RODNEY FERREIRA COUTO**

Docente da UEG – CCET, Campus Henrique Santillo (Anápolis – GO)  
rodneycouto@yahoo.com.br

**ANTONIO LÁZARO FERREIRA SANTOS**

Docente da UEG – CCET, Campus Henrique Santillo (Anápolis – GO)  
antoniolazaros@gmail.com.br

**ELTON FIALHO DOS REIS**

Docente da UEG – CCET, Campus Henrique Santillo (Anápolis – GO)  
fialhoreis@ueg.br

**Resumo:** A intensa utilização do solo com mecanização pesada e, principalmente, em condições inadequadas de umidade do solo, causa muitas vezes, a degradação de sua estrutura, resultando no aumento da sua compactação. O objetivo deste trabalho foi avaliar a variabilidade espacial de atributos físicos de um solo sob sistema de plantio direto, utilizando-se da geoestatística como procedimentos para mapeamento de fenômenos contínuos. Foi avaliada a resistência do solo à penetração, umidade e densidade relativa dos solos em duas profundidades (0 – 0,15 e 0,16 – 0,31 m), em uma malha regular de amostragem de 75m x 75m, totalizando 16 pontos amostrais. Por meio da geoestatística e da estatística descritiva, avaliou-se a variabilidade espacial dos dados. A análise da dependência espacial foi avaliada pela geoestatística e os parâmetros dos semivariogramas foram utilizados para construir mapas de isolinhas por meio do interpolador de krigagem do software GS+. Os atributos apresentaram dependência espacial, com exceção da umidade (U) na profundidade P1 (0 – 0,15m) e densidade relativa (DR) na profundidade P2 (0,16 – 0,31m), demonstrada pelos ajustes dos semivariogramas aos modelos: gaussiano, exponencial e esférico. O grau de dependência espacial é forte para todos os atributos que apresentaram ajuste aos semivariogramas. Observou-se incremento da resistência à penetração (RP) e densidade relativa (DR) com o aumento da profundidade.

**Palavras-Chave:** Geoestatística. Penetrometria. Densidade relativa.

**Abstract:** The intensive use of the soil with heavy machinery, and especially in inadequate soil moisture often causes the degradation of its structure, resulting in increased compaction. The aim of this work was evaluate the spatial variability of physical attributes of a soil under no-tillage system, using geostatistics as procedures for mapping of continuous phenomena. We evaluated the resistance to penetration, humidity and relative density of soil at two depths (0 – 0.15 and 0.16 – 0.31 m) in a regular sampling mesh of 75m x 75m totalizing 16 sample points. Through descriptive statistical analyses and geostatistical, it was evaluated the spatial variability of data. The analysis of spatial dependence was evaluated by geostatistics and the semivariogram parameters were used to construct isolines maps using kriging interpolation of the software GS+. The attributes presented spatial dependence, with except the humidity (U) at depth D1 (0 – 0.15 m) and relative density (RD) at depth D2 (0.16 – 0.31m), demonstrated by adjustments the semivariogram models: Gaussian, exponential and spherical. The degree of spatial dependence is strong for all the attributes that showed fit the semivariogram. Was observed increase in penetration resistance (PR) and relative density (RD) with increasing depth

**Keywords:** Geostatistics. Penetrometer. Relative density.

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos têm-se verificado um aumento substancial no tamanho, peso e potência das máquinas agrícolas, o que quando mal manejadas, tem como consequência um aumento de áreas com problemas de compactação e adensamento do solo. A compactação é uma alteração estrutural que promove reorganização das partículas e de seus agregados (STONE et al. 2002).

A compactação do solo ocasiona uma diminuição do volume, aumentando a densidade, conseqüentemente ocorre uma redução da porosidade total do solo, desencadeando efeitos negativos na relação micro/macroporos (GOMES; PEÑA, 1996). Esses efeitos contribuem para um decréscimo da capacidade de aeração do solo, alteram a disponibilidade de água e nutrientes, aumentam a resistência à penetração das raízes, afetam a condutividade hidráulica e a infiltração de água no solo, aumentando assim o risco de erosão.

Com vistas ao reconhecimento e à mensuração da compactação e do adensamento do solo, além dos sintomas observados nas culturas, vários métodos podem ser utilizados (CAMARGO; ALLEONI, 1997). Por meio do penetrômetro, tem-se uma maneira rápida e fácil de medir a resistência à penetração do solo (BENGHOUH; MULLINS, 2002)

A resistência do solo à penetração (RP) tem sido um dos atributos físicos mais adotados para indicar o estado de compactação, porque apresenta relações diretas com o crescimento das plantas (HOAD et al., 2000) e também, por ser mais eficiente na identificação de estados de compactação comparada à densidade do solo (STRECK et al., 2004).

Os parâmetros que exercem influência direta sobre a resistência à penetração do solo são: a textura do solo, o teor de água, densidade, o tipo de mineral de argila que ocorre no solo e a porosidade (TANAKA et al., 2007).

Valores de resistência à penetração superiores a 2,0 MPa são aceitos como impeditivos ao crescimento radicular e limitante ao rendimento das principais culturas (SILVA; KAY, 1994) . A densidade relativa isola o efeito da textura na densidade do solo, permitindo comparar solos de diferentes texturas quanto ao grau de compactação. Essa consiste na divisão da densidade do solo atual pela densidade máxima do solo obtida pelo teste de Proctor (CARTER, 1994).

Valores de Densidade Relativa acima de 0,86 são considerados elevados e prejudiciais ao desenvolvimento das culturas e abaixo de 0,80 podem afetar a produtividade de alguns

cereais em consequência da redução da capacidade de armazenamento de água no solo (LINDSTRON; VOORHEES, 1994).

Nos últimos anos, observa-se avanço no uso de modelos quantitativos, utilizados em estudos de fatores da natureza, com objetivo de compreender a distribuição de dados oriundos de fenômenos ocorridos no espaço, o que constitui um grande desafio para solucionar questões centrais em diversos campos da ciência. Entre as técnicas quantitativas de análise espacial de dados cita-se a geoestatística para a predição de dados por krigagem ordinária, que estima valores sem tendenciosidade e com variância mínima, possibilitando a interpretação dos resultados com base na variabilidade natural dos atributos avaliados, considerando a dependência espacial dentro do intervalo de amostragem (SILVA et al., 2004).

O estudo da variabilidade espacial dos atributos do solo assume importância, nos indicativos de alternativas de manejo, visando não só reduzir efeitos da variabilidade espacial sobre a produtividade das culturas, como também estimar respostas das plantas a determinadas práticas de manejo.

Em razão da ação do sistema de manejo do solo e o tráfego de máquinas em áreas agrícolas não serem uniformes em toda a área, as avaliações da distribuição espacial das características físicas assumem grande importância (SILVA et al., 2004).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a variabilidade espacial de atributos físicos de um solo, sob sistema de plantio direto, utilizando-se da técnica de geoestatística como procedimento para mapeamento de fenômenos contínuos.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

A área de estudo encontra-se inserida no município de Abadiânia – GO (Figura 01), situada na fazenda Capão do Carirú, possuindo 6,3 hectares cultivados com soja durante três safras consecutivas. O solo no local é classificado como Latossolo Amarelo, textura média, apresentando relevo suave e ondulado (BRASIL, 1981).

As amostras de solo foram coletadas em um talhão manejado sob plantio direto, adquiridas em uma malha regular de amostragem de 75m x 75m, totalizando 16 pontos amostrais, sendo que cada ponto foi georreferenciado (Figura 02).

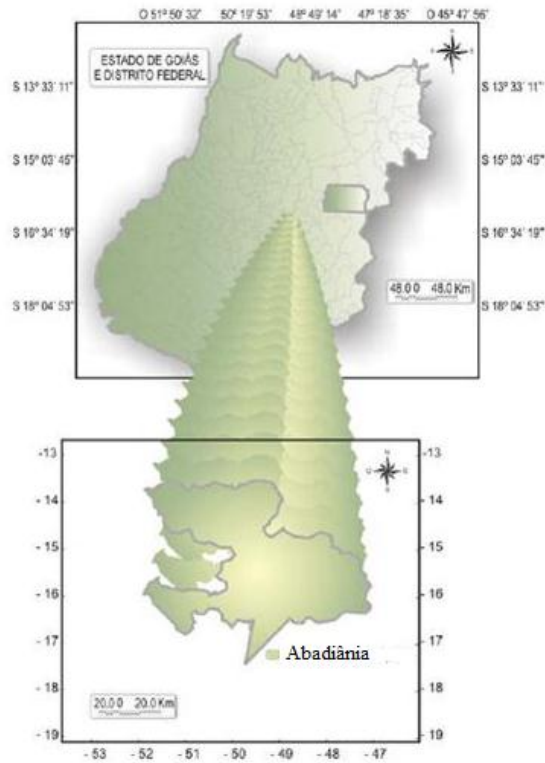


Figura 01- Localização da área de estudo. Fonte: Autores, 2015.

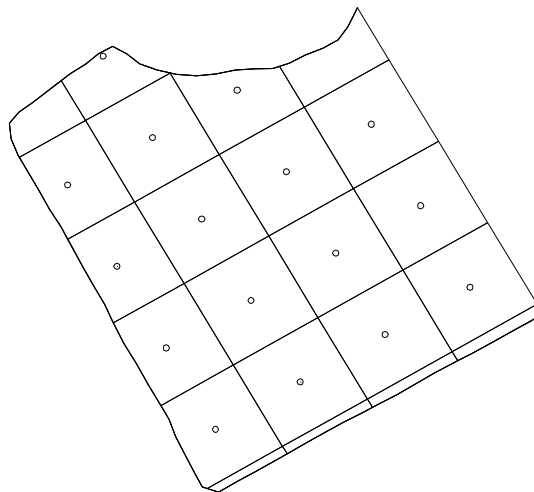


Figura 02 - Área que foi utilizada para a coleta de amostras indeformadas e medições de Resistência à Penetração, totalizando 16 pontos amostrais, mostrando o grid de amostragem. Fonte: Autores, 2015.

Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas em duas profundidades P1 (0 – 0,15 m) e P2 (0,16 – 0,31 m).

Estas amostras foram utilizadas para o ensaio de Proctor Normal e determinação da Densidade do Solo. Em cada ponto georreferenciado foram realizadas determinações de Resistência à Penetração e determinação da Umidade nas diferentes profundidades. Após a coleta, as amostras foram armazenadas em sacos plásticos vedados e transportadas para o laboratório de Mecânica dos Solos da Unidade de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Estadual de Goiás.

A densidade máxima do solo foi determinada por meio de amostras deformadas, coletadas nas camadas de 0 – 0,15 e 0,16 – 0,31 m e passadas em peneira de 4,8 mm. Para tal, utilizou-se o ensaio de Proctor Normal com reuso de material (NOGUEIRA, 1998). A determinação da densidade máxima consistiu da adição de água, homogeneização, adição de solo até 1/3 do cilindro de 10 cm por 12,73 cm ( $1.000 \text{ cm}^3$ ) que foi submetido a 26 golpes de um soquete de 2,5 kg, caindo à altura de 30,5 cm, equivalente a uma pressão de 200 kPa. Foram realizados para cada ponto amostral, cinco ensaios com valores crescentes de umidade para a construção da curva de compactação do solo, obtendo-se no ponto máximo a densidade máxima do solo e a umidade ótima de compactação.

A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico (NOGUEIRA, 1998), utilizando amostras indeformadas retiradas com amostrador tipo Uhland e anel de aço de Kopecky de bordas cortantes com volume interno de  $80 \text{ cm}^3$ . A umidade foi determinada pelo método padrão de estufa (NOGUEIRA, 1998).

A resistência à penetração foi determinada nas profundidades de 0 – 0,15 e 0,16 – 0,31 m, empregando-se um penetrômetro eletrônico Falker PLG 1020, seguindo-se as normas da ASAE S 313. A velocidade de penetração da haste foi mantida próxima a  $30 \text{ mm s}^{-1}$ , de acordo com a instrumentação do aparelho. Utilizou-se um cone com diâmetro de 12,83 mm e ângulo de penetração de  $30^\circ$ . A resolução do equipamento era de 7,7 kPa e o índice de cone máximo permitido de 7700 kPa.

Para o cálculo dos semivariogramas e respectivos ajustes foram adotados os seguintes procedimentos:

- Uso do software geoestatístico GS+ para o cálculo e ajuste dos semivariogramas experimentais;
- Verificação entre os modelos de semivariogramas fornecidos pelo software (linear, esférico, exponencial e gaussiano), o que melhor se ajustou ao modelo experimental. Ajustar

um modelo teórico com ou sem patamar a um semivariograma experimental, consiste em determinar os valores dos parâmetros efeito pepita (nugget), patamar (sill) e alcance (range).

- A verificação da qualidade do ajuste foi realizada mediante a técnica da Validação Cruzada.

Para a construção dos mapas de isolinhas foi empregado o software GS+, que realizou as interpolações utilizando-se o algoritmo da krigagem. Os parâmetros utilizados no software (modelo ajustado, efeito pepita, patamar e alcance) foram os determinados quando da construção dos semivariogramas.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 01, estão apresentados os resultados da estatística descritiva para os atributos avaliados, que serão utilizados como ferramenta auxiliar, de forma a complementar a caracterização do comportamento das variáveis estudadas.

Tabela 01- Estatística descritiva para Resistência à Penetração (RP), Umidade (U) e Densidade Relativa (DR), para os 16 pontos localizados na malha de amostragem nas profundidades P1 (0 – 0,15 m) e P2 (0,16 – 0,31 m).

Parâmetros Estatísticos	RP (MPa)		U (g g <sup>-1</sup> )			DR	
	P1	P	P1	P	P	P	
	16	1	16	1	1	1	
	1,7	6	27,	6	6	6	
Nº	3	2	88	2	0,	0,	
Amostras	1,6	,35	27,	6,40	712	749	
Média	8	2	28	2	0,	0,	
Mediana	1,0	,52	24,	6,42	700	703	
Mínimo	9	1	98	2	0,	0,	
Máximo	2,1	,18	35,	3,48	593	640	
Desvio	7	3	72	3	0,	0,	
Padrão	0,2	,17	2,7	0,57	846	969	
Variância	93	0	47	2,	0,	0,	
Coef.	0,0	,612	7,5	034	075	114	
Assimetria	86	0	49	4,	0,	0,	
Coef.	-	,375	1,5	139	006	013	
Curtose	0,35	-	2	0,	0,		
C.V.	-	0,46	2,1	41	41	1,15	
(%) <sup>1</sup>	0,32	-	3	-	-	-	
S.W <sup>2</sup> p-	16,	0,89	9,8	0,53	0,71	0,31	
value	94	2	5	7,	1		
	0,6	6,00	0,0	71	0,51	15,22	
	75	0	14*	0,	0,		
		,346		615	543	0,001*	

<sup>1</sup> Coeficiente de variação; <sup>2</sup> Valores de probabilidade de Shapiro – Wilk; p-value < 0,05 (\*) não normalidade dos dados.

Fonte: Autores, 2015.

Apesar da ocorrência de algumas distribuições assimétricas, os valores da média e mediana de todos os atributos estudados são próximos, mostrando que os dados não apresentam assimetria acentuada e, segundo Little e Hills (1978), quando os valores da média, mediana e moda apresentam valores semelhantes, os dados apresentam ou aproximam da distribuição normal. Isto pode ser um indicativo de que as medidas de tendência central não são dominadas por valores atípicos na distribuição (CAMBARDELLA et al., 1994), demonstrando que todos os atributos envolvidos no estudo estão aproximando-se de uma distribuição normal indicando que os dados estão adequados para o uso da geoestatística.

Com base nos limites do CV propostos por Warrick e Nielsen (1980) para classificação da variabilidade de propriedades físicas do solo, os dados indicaram alta variação para RP na profundidade de 0,16 – 0,31 m e variação média na profundidade 0 – 0,15 m. Para valores de DR na profundidade de 0,16 – 0,31 m, também obteve-se valores médios de coeficiente de variação. Para U nas duas profundidades e DR na profundidade de 0 – 0,15 m obteve-se baixo coeficiente de variação.

Para verificar a normalidade, aplicou-se o teste de Shapiro-Wilk a nível de 95% de probabilidade, indicando que apenas os dados de U e DR nas profundidades, 0 – 0,15 m e 0,16 – 0,31 m, respectivamente, não apresentaram distribuição normal.

Segundo GONÇALVES et al., (2001), nas estimativas pela krigagem, a distribuição normal dos dados é interessante na avaliação da dependência espacial, porém mais importante que a normalidade é a verificação de que os dados não apresentam tendência.

A análise geoestatística foi realizada e verificou-se que os atributos estudados apresentaram dependência espacial com exceção da umidade na profundidade de 0 – 0,15 m e densidade relativa na profundidade de 0,16 – 0,31 m (Tabela 2).

Tabela 02- Parâmetros dos semivariogramas ajustados aos dados experimentais de RP (MPa), U (g g<sup>-1</sup>) e DR para as profundidades P1 (0 – 0,15 m) e P2 (0,16 – 0,31 m).

Propriedades do Solo	Modelo	Geoestatística								
		C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> + C <sub>1</sub>	a	2	r	RS S	DE (%)		
RP – P1	Gaussiano	0,009	0	0,0865	20,72	1	0,604	0	5,37 x 10 <sup>-4</sup>	0,40
RP – P2	Gaussiano	0,128	0	0,8700	86,88	4	0,992	0	2,55 x 10 <sup>-3</sup>	7,71
U – P1	EPP	0,549	0	-	-	-	-	-	-	-
U – P2	Gaussiano	0,750	1	0,0490	33,01	4	0,938	0	0,61	1,74
DR – P1	Esférico	0,001	0	0,0075	30,80	3	0,000	1	7,07 x 10 <sup>-8</sup>	7,33
DR – P2	EPP	0	0	-	-	-	-	-	-	-

P2

,002

$C_0$  – efeito pepita;  $C_0 + C_1$  – patamar;  $a$  – alcance (m);  $r^2$  – coeficiente de determinação; RSS – soma dos quadrados dos resíduos; e  $GDE = [C_0 / (C_0 + C_1)] \times 100$ .

GDE – Grau de dependência espacial (forte  $\leq 25\%$ ; moderada 26 a 75%; fraco  $\geq 75$  a 100%; e EPP - efeito pepita puro  $\geq 100\%$ ).

Fonte: Autores, 2015

A ausência de dependência espacial, para essas variáveis, foi constatada pela inexistência do patamar ( $C_0 + C_1$ ) nos semivariogramas, ocorrendo o que se denomina efeito pepita puro. Para a U e a DR nessas profundidades, a variabilidade do solo é acentuada, necessitando de um plano de amostragem com pontos mais próximos que o utilizado neste estudo ou um maior número de repetições. Todos os atributos que se ajustaram aos semivariogramas, apresentaram forte dependência espacial.

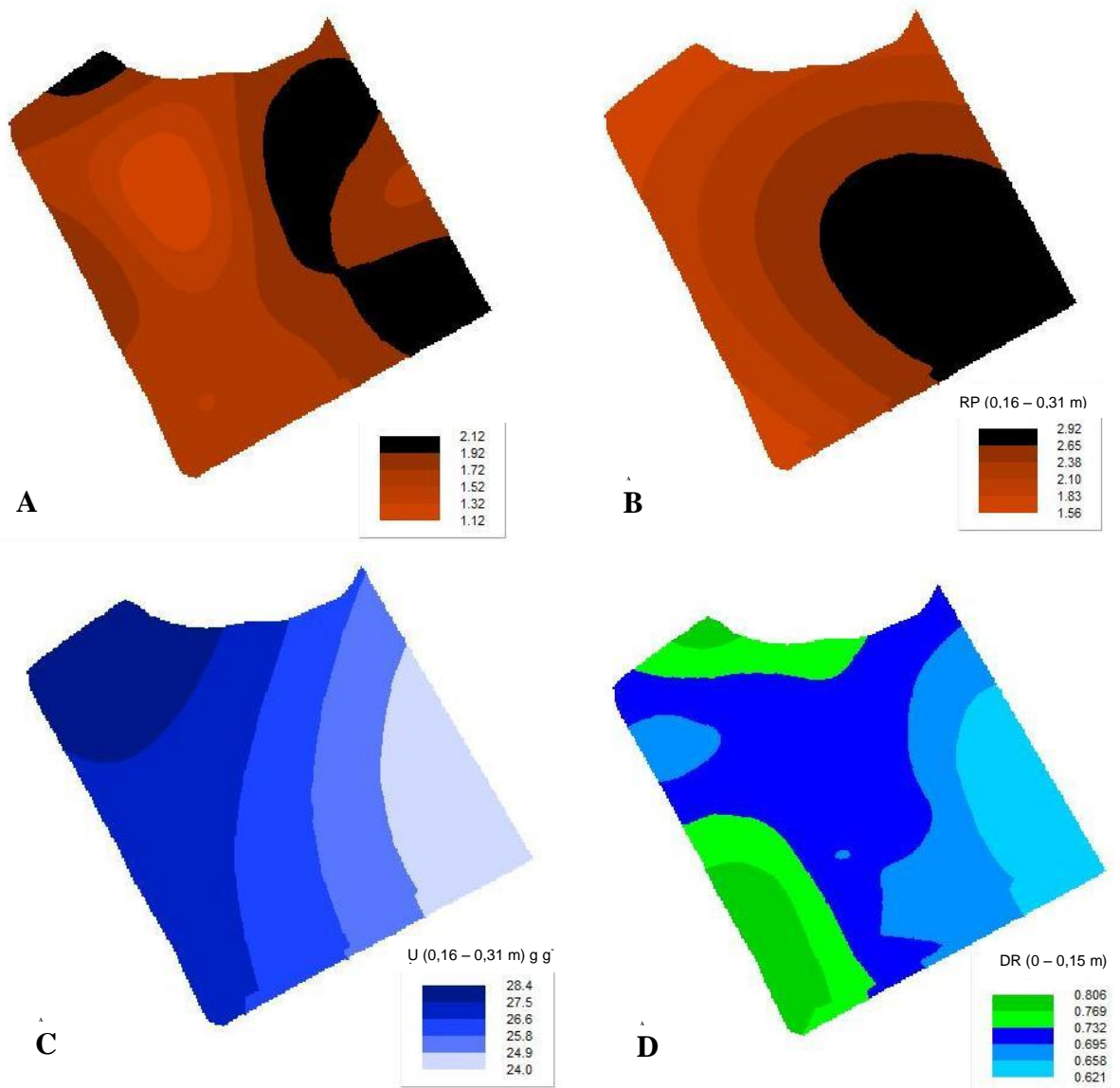


Figura 03 - Mapas de variabilidade espacial da Resistência do Solo à penetração (RP), Umidade do Solo (U) e Densidade Relativa (DR), para as profundidades P1 (0 – 0,15 m) e P2 (0,16 – 0,31 m). Fonte: Autores, 2015.



Para as profundidades de amostragem nas quais as variáveis apresentaram ajustes aos semivariogramas, foram feitos mapas de isolinhas através da técnica de krigagem (Figura 3), enquanto que aquelas profundidades que apresentaram efeito pepita puro, não se aplica métodos geoestatísticos, e considera que as diferenças são descritas pela média.

Observando os mapas de RP, Figura 03 A e B, é possível verificar que no mapa de RP 0 – 0,15 m existe variabilidade da variável em estudo. Entretanto, essa variação encontra-se praticamente abaixo dos 2,0 MPa, valor considerado por vários autores como limitante ao crescimento radicular das principais culturas (TAYLOR et al., 1966; TORMENA et al., 1998; SUZUKI et. al., 2007). No mapa de RP 0,16 – 0,31 m nota-se nitidamente a predominância de regiões com valores acima dos 2,0 MPa. Esse aumento da RP com a profundidade é devido à existência de uma compactação subsuperficial, conhecida como pé-de-arado ou pé-de-grade, ocasionada pelos implementos agrícolas utilizados quando a região era manejada com cultivo convencional.

A umidade média do solo obtida durante a determinação da RP foi de 27,88 e 26,15 g g<sup>-1</sup>, respectivamente para as profundidades de 0 – 0,15 e 0,16 – 0,31 m (Tabela 1). Esta diferença no teor de água mesmo que pequena é de extrema importância em razão de ser o parâmetro que mais afeta na determinação da RP e se deve à cobertura vegetal que estava presente no local.

No Figura 3 C, é possível verificar que as regiões de maiores umidades equivalem as de menor RP e as de menor umidade apresentam valores superiores de RP. Uma análise de correlação de Pearson demonstrou que a RP correlaciona-se negativamente com a U ( $r^2 = -0,385$  e  $r^2 = -0,287$ , sendo  $p < 0,05$ ), respectivamente nas profundidades de 0 – 0,15 e 0,16 – 0,31 m.

Considerando os valores médios de DR observa-se que na profundidade de 0,16 – 0,31 m esse atributo apresentou valor mais elevado quando comparado com a profundidade de 0 – 0,15 m (Tabela 1). Esse aumento pode ser explicado pelo aumento da densidade do solo com a profundidade, ou seja, tem-se um numerador maior na relação que define a densidade relativa.

Segundo Lindstron e Voorhees (1994), valores inferiores a 0,80 podem afetar negativamente a produtividade de alguns cereais em consequência da redução da capacidade de armazenamento de água por causa da grande quantidade de macroporos em relação à de microporos.

Ao relacionar a densidade relativa com a resistência à penetração de 2,0 MPa, valor considerado limitante ao crescimento radicular, Suzuki et. al. (2007), obtiveram o valor de 0,84 em Latossolo.

Segundo BEUTLER (2005), observou que a densidade relativa do solo ótima para rendimento da soja (*Glycine max* L.), em casa de vegetação, foi de 0,84 e 0,75 respectivamente, em Latossolo Vermelho de textura argilosa e em Latossolo Vermelho de textura média. Enquanto que em nível de campo, em solo de textura argilosa, a densidade relativa ótima encontrada foi de 0,80. Desta forma, no mapa da Figura 3 D, apenas as regiões em tom verde escuro apresentam valores ótimos de DR para a soja.

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O grid utilizado mostrou-se eficiente para determinar a variabilidade espacial dos atributos estudados, com exceção da Umidade (U) para a profundidade P1 (0 – 0,15 m) e Densidade Relativa (DR) para a profundidade P2 (0,16 – 0,31 m), os quais apresentaram variação aleatória e efeito pepita puro.

Entre os modelos de semivariogramas, com base na validação cruzada, o Gaussiano mostrou-se o mais indicado para os atributos: RP nas profundidades P1 e P2 e U na profundidade P2.

A DR na profundidade P2 foi modelada utilizando o modelo de semivariograma esférico.

Todas as variáveis que apresentaram ajuste aos semivariogramas experimentais demonstraram forte grau de dependência espacial.

O estudo da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo pela geoestatística, utilizando a técnica da krigagem, mostrou-se eficiente na geração de mapas georreferenciados.

## **6. AGRADECIMENTOS**

Essa pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Mecânica dos Solos da Unidade Universitária de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Estadual de Goiás e apresenta os resultados obtidos no Trabalho de Conclusão de Curso do primeiro autor. Os autores agradecem a equipe do laboratório da UnUCET-UEG.

## 7. REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. ASAE S-313: Soil cone penetrometer. St. Joseph: ASAE, 1999, 835p.
- BENGHOUH, A. G; MULLINS, C. E. Mechanical impedance to growth root: a review of experimental techniques and root growth. **Journal of soil Science**. v. 41, n.2, 341-358, 2002.
- BEUTLER, A. N; CENTURION, J. F; ROQUE, C. G; FERRAZ, M. V. Densidade relativa ótima para a produtividade de soja em Latossolos Vermelhos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 29, n. 6, 843-849, 2005.
- BRASIL. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro: EMBRAPA SOLOS, 1997, 212p.
- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Projeto RADAMBRASIL: **Folha SD.22 Goiás**. Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra, IBGE. Brasília: MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 1981, 640p.
- CAMBARDELLA, C. A; MOORMAN, T. B; NOVAK, J. M; PARKIN, T. B; KARLEN, D. L; TURCO, R. F; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of America Journal**. v. 58, n.5, 1501-1511, 1994.
- CAMARGO, O. A; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: Esalq, 1997.
- CARTER, M. R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. **Canadian Journal of Soil Science**. v. 70, n.1, 425-433, 1990.
- GOMES, A; PEÑA, Y. A. Caracterização da compactação através do uso do penetrômetro. **Lavoura Arrozeira**. v. 49, n.1, 18-20, 1996.
- GONÇALVES, A. C. A; FOLEGATTI, M. V; MATA, J. D. V. Análises exploratória e geoestatística da variabilidade de propriedades físicas de um Argissolo Vermelho. **Acta Scientiarum**. v. 23, n.5, 1149-1157, 2001.
- HOAD, S. P; SILVA, A. P; DIAS JUNIOR, M. S. TORMENA CA. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 25, n.1, 11-18, 2000.
- LINDSTRON, M. J; VOORHEES, W. B. **Response of temperate crops to soil compaction**. In: SOANE, B. D; VAN OUWERKERK, C. **Soil compaction in crop production**. London: Elsevier, 1994; p.265-286.
- LITTLE, T. M; HILLS, F. J. Agricultural experimentation: **design and analysis**. New York: J. Wiley, 1978, 350p.

NOGUEIRA, J. B. Mecânica dos solos. **Ensaio de Laboratório**. São Carlos: EESC-USP, 1998, 37p.

SILVA, A. P; KAY, B. D; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**. v. 58, n.1, 1775-1781, 1994.

SILVA, A. P; KAY, B. D; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. **Soil Science Society of America Journal**. v.58, 1775-1781, 1994.

SILVA, V. R; REICHERT, J. M; REINERT, D. J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ciência Rural**. v. 34, n.2, 399-406, 2004.

STRECK, C. A; REINERT, D. J; KAISER, D. R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**. v. 34, n.3, 755-760, 2004.

STONE, L. F; GUIMARÃES, C. M; MOREIRA, A. A. J. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 6, n.2, p. 207-212, 2002.

SUZUKI, L. E. A. S; REICHERT, J. M; REINERT, D. J; LIMA, C. L. R. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 42, n.8, 1159-1167, 2007.

TANAKA, E. M; JUNIOR, S. W. Solo duro. **Revista Cultivar Máquinas**. v. 64, n.1, 14-17, 2007.

TAYLOR, H. M; ROBERSON, G. M; PARKER, J. J. Soil strength-root penetration relations to coarse textured materials. **Soil Science**. v. 102, n.1, 18-22, 1966.

TORMENA, C. A; SILVA, A. P; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 22, 573-581, 1998.

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, 1980.