

AGRÁRIA

Revista Brasileira de Ciências Agrárias

ISSN (on line): 1981-0997

v.6, n.2, p.331-336 abr.-jun., 2011

Recife, PE, UFRPE. www.agraria.ufrpe.br

Protocolo 882 - 25/03/2010 *Aprovado em 07/04/2011

DOI:10.5039/agraria.v6i2a882

Eduardo L. Bottega^{1,3}

Simone P. Bottega²

Samuel de A. Silva^{1,3}

Daniel M. de Queiroz^{1,4}

Cristiano M. A. de Souza^{2,4}

Leidy Z. L. Rafull²

Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em um Latossolo Vermelho distroférico

RESUMO

Objetivou-se com este estudo, avaliar a variabilidade espacial da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho distroférico. O experimento de campo foi instalado na Fazenda Experimental da Universidade Federal da Grande Dourados, em Dourados/MS. Utilizou-se uma área experimental de 5,02 ha e grid amostral de 25 x 25 metros, com pontos georreferenciados por um GPS. A resistência à penetração foi determinada utilizando um penetrógrafo com haste de 60 cm. A umidade do solo na área, no momento da coleta de dados, foi de 18,5% base seca (bs). Os dados foram submetidos à análise geoestatística utilizando o programa GS+ e os mapas foram confeccionados no programa computacional Surfer, versão 8. A camada compreendida entre a faixa de 12 e 16 cm apresentou maior média dos valores de resistência à penetração em relação às demais camadas estudadas. O grau de dependência espacial foi classificado como moderado para todas as profundidades estudadas. Os modelos que melhor se ajustaram à distribuição espacial dos valores de resistência à penetração foram os modelos exponencial (profundidades de 12 e 16 cm) e linear (8 e 20 cm). Os dados amostrados podem incrementar um banco de dados SIG, para futuras análises e tomada de decisões quanto a procedimentos de manejo do solo.

Palavras-chave: Agricultura de precisão, compactação, geoestatística.

Spatial variability of soil resistance to penetration in an Oxisol

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the spatial variability of the penetration resistance of an Oxisol. The field experiment was installed in the Experimental Farm of the Federal University of Grande Dourados, Dourados, Mato Grosso do Sul, Brazil. An experimental area of 5.02 ha and sampling grid of 25 x 25 m, with points georeferenced using a GPS, was used. The penetration resistance was determined using a 60 cm penetrometer rod. The soil humidity in the area at the time of data collection was 18.5 % dry base. Data were analyzed using the geostatistics software GS+ and the maps were made in the software Surfer, version 8. The layer ranging between 12 and 16 cm showed higher mean resistance values than the other studied layers. The spatial dependence degree was classified as moderate for all layers. The models that best fitted the spatial distribution of the penetration resistance values were the exponential (depths of 12 and 16 cm) and linear models (8 and 20 cm). The sampled data can be used to build a GIS database for future analysis and decision making regarding the procedures for soil management.

Key words: Precision agriculture, compacting, geostatistics.

¹ Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola, Campus Universitário, CEP 36570-000, Viçosa-MG, Brasil. Fone: (31) 3899-1882. Fax: (31) 3899-2735. E-mail: eduardo-bottega@hotmail.com; samuel-assis@hotmail.com; queiroz@ufv.br;

² Universidade Federal da Grande Dourados, Faculdade de Ciências Agrárias, Rodovia Dourados-Itahum, km 12, Cidade Universitária, CEP 79804-970, Dourados-MS, Brasil. Caixa Postal 322. Fone: (67) 3410-2412. Fax: (67) 3410-2352. E-mail: sibottega@hotmail.com; csouza@ufgd.edu.br; leidyrafull@ufgd.edu.br

³ Bolsista de Doutorado do CNPq

⁴ Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq

INTRODUÇÃO

Em um sistema produtivo, além dos cuidados com a fertilidade do solo, é imprescindível dedicar atenção às características físicas do solo, tais como porosidade, agregação, resistência à penetração e densidade. As condições físicas em que o solo se encontra durante a fase de implantação e desenvolvimento de uma determinada cultura influencia consideravelmente sua produtividade. Uma das formas de alterar a condição física do solo é através de seu manejo, buscando criar condições estruturais favoráveis ao crescimento e desenvolvimento da planta, tanto da parte aérea quanto das raízes.

Com relação aos indicadores de qualidade física dos solos, Singer & Ewing (2000) e Imhoff (2002) sugerem que a escolha deve recair sobre aqueles que estão relacionados diretamente à produção das culturas e que sejam suficientemente potentes para medir a capacidade do solo de fornecer adequada aeração e quantidade de água para o crescimento e expansão do sistema radicular, da mesma forma que devem medir a magnitude com a qual a matriz do solo resiste à deformação. Os indicadores de qualidade física do solo mais utilizados são a densidade, a porosidade total, a distribuição e o tamanho dos poros, a distribuição das partículas, a resistência do solo à penetração, a profundidade efetiva de enraizamento, o intervalo hídrico ótimo, o índice de compressão, o diâmetro médio de agregados e o nível de matéria orgânica.

Segundo Tavares-Filho et al. (2001), um diagnóstico qualitativo (distribuição espacial das estruturas no perfil do solo) e quantitativo (grau da compactação do solo) ganha importância para auxiliar na verificação da qualidade do manejo utilizado e também no estabelecimento de limites de compactação que não afetem o crescimento radicular das plantas nos diferentes sistemas de manejo.

Dessa forma, o monitoramento periódico do estado de compactação do solo por meio da resistência à penetração é uma forma prática de avaliação dos efeitos dos diferentes sistemas de manejo na estrutura do solo e no crescimento radicular das diferentes culturas, permitindo assim pesquisas e avaliações na propriedade rural (Tavares-Filho & Ribon, 2008).

O uso crescente do GPS (*Global Positioning System*) na agricultura, associado às técnicas de geoestatística, vem auxiliando a realização do mapeamento de atributos qualitativos e quantitativos das características químicas e físicas do solo; dentre tais características, a compactação do solo em diferentes profundidades.

Grego & Vieira (2005) ressaltam que as construções de mapas com os valores obtidos por meio de krigagem são importantes para a verificação e interpretação da variabilidade

espacial. A análise geoestatística dos dados é completada com as informações mostradas nos mapas, que são visualmente comparadas para o entendimento da variabilidade das propriedades físicas e hídricas do solo no campo, e que são úteis nas tomadas de decisões.

Com o avanço da utilização de técnicas geoestatísticas aplicadas a problemas relacionados à ciência da terra, difusão da utilização de técnicas de agricultura de precisão e importância da resistência do solo à penetração de raízes para o desenvolvimento das culturas agrícolas, buscou-se, com este estudo, avaliar a variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em um Latossolo Vermelho distroférrico.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento de campo foi instalado na Fazenda Experimental da Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados, localizada no Município de Dourados, estado de Mato Grosso do Sul, em solos classificados como Latossolo Vermelho Distroférrico, textura argilosa (EMBRAPA, 2006); classe representativa da maioria dos solos do centro sul do estado. Na área é adotado o sistema de plantio direto, com sucessão de culturas (soja e milho) por mais de 10 anos. Algumas das características químicas e físicas das amostras de solo encontram-se na Tabela 1.

Foi delimitada uma área experimental de 5,02 ha (150 x 335 m). A grade amostral utilizada foi composta por pontos espaçados regularmente em 25 x 25 m e georreferenciados utilizando um receptor GPS, com correção diferencial, modelo Promark 2. As coordenadas obtidas foram corrigidas no programa computacional Astec Solutions®, fornecido pelo fabricante do equipamento. O arquivo utilizado como base para a correção diferencial foi obtido no site do IBGE, relativo à estação da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) localizada em Campo Grande/MS, e o *datum* utilizado foi o SIRGAS 2000.

O grid da área com seus respectivos pontos amostrais (n=60). Os pontos circulados indicam onde foram coletadas as amostras para determinação da umidade gravimétrica do solo da área (Figura 1).

Para determinação da umidade gravimétrica, amostras foram coletadas em profundidades de 20 cm utilizando um trado tipo holandês, acondicionadas em embalagens que não permitiam a perda de água por evaporação, pesadas para a obtenção da massa úmida e levadas à estufa à temperatura padrão até atingirem peso constante (massa seca do solo). As amostras foram novamente pesadas e a umidade foi determinada segundo a equação 1:

Tabela 1. Características químicas e físicas do solo da área de estudo

Table 1. Chemical and physical characteristics of the soil of the study area

pH	K ⁺	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H ⁺ +Al ³⁺	SB	CTC	V	P	MO	Areia	Silte	Argila
6	6	1	47	45	63	98	161	60	21	37	350	90	560

pH em H₂O; K⁺, Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, H⁺+Al³⁺, SB e CTC em mmol_cdm⁻³; V em %; P em mg.dm⁻³; MO em g.dm⁻³; e; Areia, Silte e Argila em g.kg⁻¹

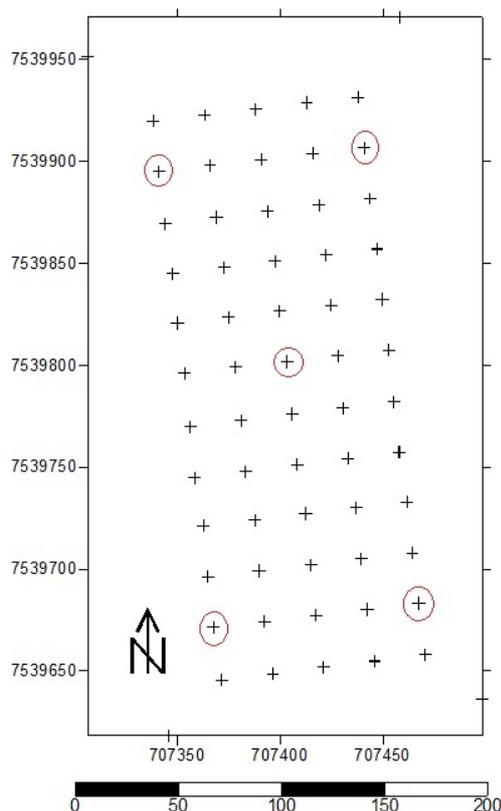


Figura 1 - Grid amostral da área e pontos amostrais de umidade gravimétrica

Figure 1 - Grid sampling area and sampling points of moisture

$$U = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100 \quad (1)$$

em que: U – umidade gravimétrica do solo, %; Mu – massa úmida do solo, g; Ms – massa seca do solo, g.

Em cada ponto georreferenciado, foram realizadas três medições de resistência à penetração (ASABE, 2006), utilizando um penetrógrafo modelo SC60 com haste de 60 cm. As leituras foram registradas em um cartão de papel contendo um gráfico, digitalizadas com auxílio de um scanner e processadas no programa computacional Sacrid. Os arquivos gerados foram exportados no formato txt e interpolados no programa InterCONE para a obtenção da resistência do solo à penetração, com intervalos de 1 cm de profundidade.

Para verificar a dependência espacial das variáveis e interpolar os dados, foi empregada a análise geoestatística, segundo Vieira (2000). Foram construídos variogramas partindo das pressuposições de estacionaridade da hipótese intrínseca e do cálculo da semivariância estimada na equação 2.

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

em que $N(h)$ é o número de pares experimentais de observações $Z(x_i)$ e $Z(x_i+h)$ separados por uma distância h . O variograma é representado pelo gráfico $\hat{\gamma}(h)$ versus h .

Modelos teóricos como o esférico, o exponencial e o gaussiano foram testados para o ajuste do semivariograma escalonado pela variância dos dados, definindo os parâmetros: efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C) e alcance da dependência espacial (a). Para a escolha do modelo de melhor ajuste, utilizou-se a menor soma do quadrado dos resíduos (SQR) e o maior coeficiente de determinação (R^2). Comprovada a dependência espacial, estimaram-se valores pelo método da krigagem para locais não amostrados (Lima et al., 2010).

O índice de dependência espacial (IDE), que é a proporção em porcentagem do efeito pepita (C_0) em relação ao patamar ($C_0 + C$), foi calculado usando a equação 3, de acordo com Cambardella et al. (1994), que apresenta as seguintes proporções: (a) dependência forte < 25%; (b) dependência moderada de 26 a 75 %; (c) dependência fraca > 75 %; e (d) independência entre as amostras, quando a relação for igual a 100%.

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

As análises geoestatísticas foram realizadas utilizando o programa GS+ (Gamma Design), e para a confecção dos mapas de compactação do solo, utilizou-se o programa computacional Surfer (Golden Software), versão 8.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A umidade gravimétrica do solo, no momento das leituras, foi de $18,5 \pm 0,8$ %, representando variação inferior a 5%; assim sendo, optou-se por considerar a umidade uniforme no solo da área. Como este valor se encontra acima da faixa friável, a umidade pode ter influenciado as leituras de resistência à penetração, porém de forma homogênea, ou seja, o erro amostral foi presente em todas as leituras.

As variações dos valores de resistência à penetração podem ser resultantes do tráfego inadequado de máquinas agrícolas na área, estando o solo com umidade acima da faixa friável, ou seja, superior à recomendada para operações mecanizadas, sejam elas de plantio, manejo ou colheita de culturas.

No resumo da análise estatística descritiva para a resistência do solo à penetração nas diferentes profundidades estudadas (Tabela 2), observa-se que o valor médio para 8 cm é similar ao valor médio observado a 20 cm, sendo que estes valores médios apresentam-se inferiores aos valores observados para 12 e 16 cm, demonstrando assim que o maior grau de compactação localiza-se nesta faixa de profundidade. Como o revolvimento do solo em plantio direto é mínimo, pode ocorrer a formação de camadas compactadas pela distribuição das pressões exercidas na superfície do solo pelas máquinas/implementos (Cruz et al., 2003). A média da resistência à penetração apresenta-se consideravelmente alta, equiparando-se aos valores encontrados por Rosolem et al. (1994), Araújo et al. (1999) e Grego & Benez (1999), obtidos em solos argilosos sob sistema de plantio direto, estudando a influência da compactação do solo no desenvolvimento de plantas.

Tabela 2. Análise descritiva dos valores de resistência à penetração (MPa) observados em diferentes profundidades

Table 2. Descriptive analysis of the resistance to penetration values (MPa) observed at different depths

Parâmetro	Profundidade (cm)			
	08	12	16	20
Média	4,9	5,3	5,2	4,8
Desvio-padrão	1,4	1,1	0,9	0,7
Variância	2,1	1,2	0,9	0,6
Mínimo	1,4	2,9	3,4	2,9
Máximo	7,3	7,3	7,3	6,7
Assimetria	-0,43 (0,31)	-0,04 (0,31)	0,27 (0,31)	0,42 (0,31)
Curtose	-0,49 (0,61)	-0,57 (0,61)	-0,74 (0,61)	0,28 (0,61)

Tabela 3. Parâmetros dos variogramas e índice de dependência espacial (IDE)

Table 3. Variograms parameters and spatial dependence index (SDI)

Parâmetro	Profundidade (cm)			
	08	12	16	20
Efeito Pepita (C_0)	1,611	0,683	0,445	0,385
Patamar (C_0+C)	2,682	1,367	1,004	0,704
Alcance (a)	261,70	66,70	37,43	250,73
R^2	0,71	0,65	0,50	0,60
RSS	0,29	0,08	0,03	0,06
IDE (%)	49	50	44	45

Ainda na Tabela 2, observa-se uma variação dos valores mínimos e máximos de resistência à penetração, 1,4 e 7,3 MPa, respectivamente, demonstrando que, embora a área em estudo seja pequena e a variação da umidade baixa (inferior a 5%), a resistência do solo à penetração não se apresenta homogênea, sendo o tráfego inadequado de máquinas agrícolas a principal causa desta variação. Outro detalhe interessante a se ressaltar relaciona-se aos valores de variância e desvio-padrão, em que pode-se observar que, com o acréscimo da profundidade, tais valores diminuem, demonstrando que em camadas mais superficiais a variabilidade do grau de compactação é maior, mostrando que o efeito da compactação pelo tráfego de máquinas é refletido nestas regiões. A constatação da continuidade espacial de valores de resistência à penetração maiores que 2,0 MPa em Latossolo Vermelho distroférico típico sob plantio direto também foi feita por Silva et al. (2004).

Na Tabela 3, observa-se que o valor do efeito pepita diminuiu conforme o aumento da profundidade. Segundo Guimarães (2004), quanto menor for a proporção do efeito pepita para o patamar do variograma, maior será a continuidade do fenômeno e a variância da estimativa, e maior será a confiança que se pode ter na estimativa. Em todas as profundidades estudadas, constatou-se que o grau de dependência espacial é considerado moderado (Cambardella et al. 1994), sendo estes resultados semelhantes aos encontrados por Grego & Vieira (2005), em que as variáveis profundidade do penetrômetro e resistência média à penetração apresentaram variabilidade espacial com razão de dependência moderada para a camada superficial de 0 - 25 cm de profundidade.

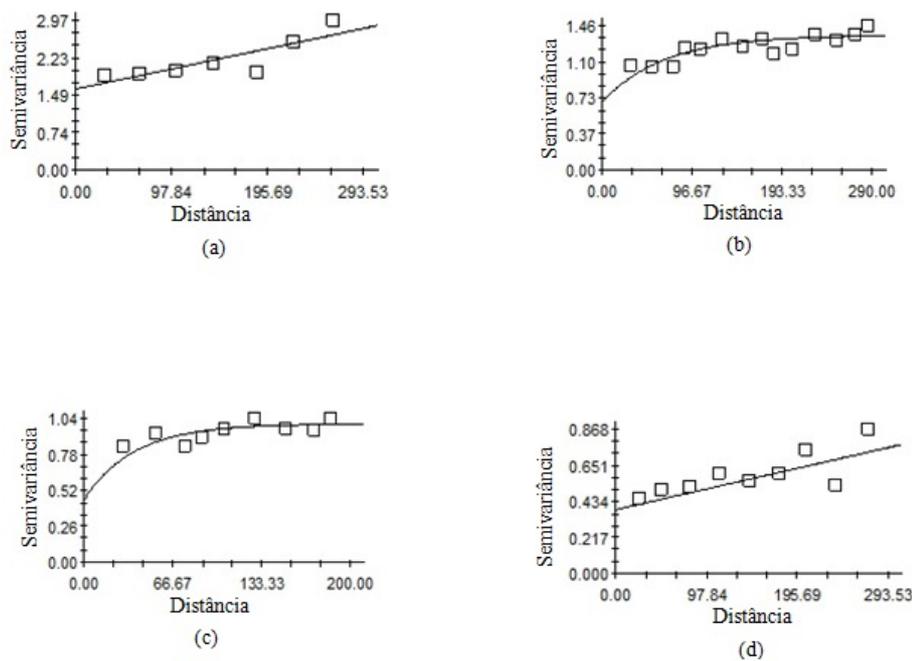


Figura 2. Variogramas ajustados aos modelos teóricos: (a) 8 cm, (b) 12 cm, (c) 16 cm e (d) 20 cm de profundidade

Figure 2. Variograms fitted to the theoretical models: (a) 8 cm, (b) 12 cm, (c) 16 cm and (d) 20 cm in depth

Na Figura 2 são apresentados os variogramas ajustados aos modelos teóricos que melhor descrevem o comportamento da variabilidade espacial da resistência do solo à penetração das raízes nas diferentes profundidades estudadas. O modelo que melhor se ajustou à distribuição espacial dos valores de resistência à penetração para as profundidades de 12 e 16 cm foi o modelo exponencial (Figura 2b e 2c), concordando com estudos realizados por McBratney & Webster (1986), que verificaram que o ajuste do variograma para as propriedades do solo nos modelos esférico e exponencial foram os mais frequentemente encontrados. Nas profundidades de 8 e 20 cm (Figura 2a e 2d), os variogramas não apresentaram patamares definidos, sendo o modelo linear o que melhor se ajustou aos dados. Isso sugere que, para estas profundidades, a malha

amostral não foi sensível em detectar tal dependência, uma vez que o comportamento linear foi observado mesmo após a modelagem da tendência dos dados. Esse fato inviabilizou o ajuste a outro modelo, impossibilitando assim a confecção de mapas temáticos.

Na Figura 3 está representada a resistência à penetração nas profundidades de 12 e 16 cm, onde se observa a predominância de valores entre 5,2 e 7,2 MPa. Segundo Ehlers et al. (1983), valores na ordem de 5,0 MPa são admitidos quando se utiliza como manejo o sistema de plantio direto; sendo assim, pode-se inferir que a área de estudo, embora utilize tal manejo, o está realizando de forma inadequada, não respeitando a faixa recomendada de umidade do solo para a realização de operações agrícolas

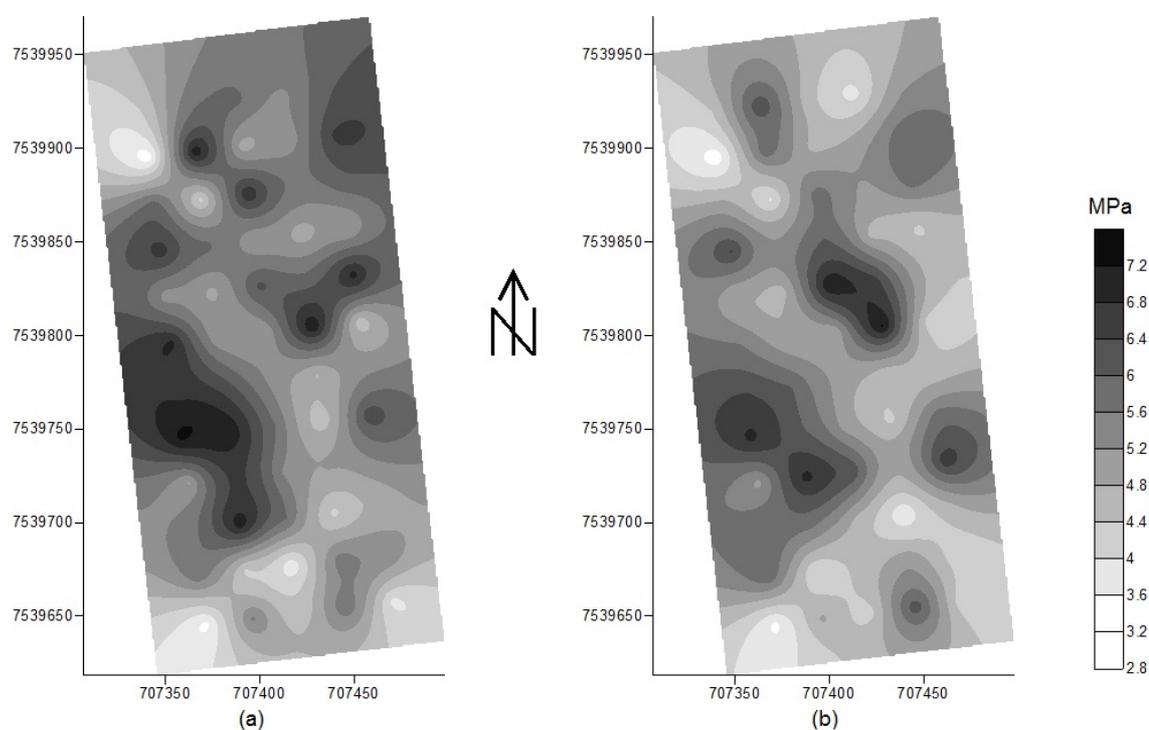


Figura 3. Resistência do solo à penetração nas profundidades de 12 cm (a) e 16 cm (b)

Figure 3. Soil resistance to penetration in depths of 12 cm (a) and 16 cm (b)

mecanizadas. É válido lembrar que a quantidade de água existente no solo está intimamente ligada aos valores de resistência à penetração, e qualquer alteração neste último fator pode modificar tais valores.

CONCLUSÕES

A camada na faixa compreendida entre 12 e 16 cm

apresentou maior média dos valores de resistência do solo à penetração.

O grau de dependência espacial foi classificado como moderado para todas as profundidades.

Não se encontrou dependência espacial do grau de compactação para as profundidades de 12 e 20 cm.

Os dados amostrados podem incrementar um banco de dados SIG para futuras análises e tomada de decisões quanto a procedimentos de manejo do solo.

LITERATURA CITADA

- Araújo, A.G.; Casão Junior, R.; Ralisch, R.; Siqueira, R. Mobilização do solo e emergência de plantas na semeadura direta de soja (*Glycine max* L.) e milho (*Zea mays* L.) em solos argilosos. Engenharia Agrícola, v.19, n.2, p.226-237, 1999.
- American Society of Agricultural Engineers - ASABE. ASABE EP542 - Procedures for using and reporting data obtained with the soil cone penetrometer. St. Joseph: ASABE, 2006. p.1053-1055.
- Cambardella, C.A.; Moorman, 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 soils. Soil Science Society of American Journal, v.58, n. 5, p.1501-1511, 1994. [Crossref](#)
- Cruz, A.C.R.; Pauletto, E.A.; Flores, C.A.; Silva, J.B. Atributos físicos e carbono orgânico de um argissolo vermelho sob sistemas de manejo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.27, n.6, p.1105-1112, 2003. [Crossref](#)
- Ehlers, W.; Kopke, V.; Hesse, F.; Böhm, W. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. Soil Tillage Research, v.3, n.2, p.261-275, 1983. [Crossref](#)
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Rio de Janeiro: Embrapa, 2006. 412p.
- Grego, C.R.; Benez, S.H. Cobertura vegetal espontânea e produtividade da cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), através do preparo do solo e manejo da cobertura. Revista Energia na Agricultura, v.14, n. 1, p.29-38, 1999.
- 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. [Crossref](#)
- Guimarães, E.C. Geoestatística básica e aplicada. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2004. 77p. (Apostila).
- Imhoff, S.C. Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de Latossolos e Argissolos Vermelhos. Piracicaba: Escola Superior Luiz de Queiroz/USP, 2002. Tese Doutorado.
- Lima, J.S.S.; Souza, G.S.; Silva, S.A. Amostragem e variabilidade espacial de atributos químicos do solo em área de vegetação natural em regeneração. Revista Árvore, v.34, n.1, p.127-136, 2010. [Crossref](#)
- McBratney, A.B.; Webster, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. Journal of Soil Science, v.37, n. 4, p.617-639, 1986. [Crossref](#)
- Rosolem, C.A.; Almeida, A.C.S.; Sacramento, L.V.S. Sistema radicular e nutrição da soja em função da compactação do solo. Bragantia, v.53, n.2, p.259-266, 1994. [Crossref](#)
- 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, p.399- 406, 2004. [Crossref](#)
- Singer, M.; Ewing, S. Soil quality. In: Sumner, M.E. (Ed.) Handbook of soil science. Boca Raton: CRC Press, 2000. p.271-298.
- Tavares Filho, J.; Barbosa, G.M.C.; Guimarães, M.F.; Fonseca, I.C.B. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.25, n. 3, p.725-730, 2001.
- Tavares Filho, J.; Ribon, A.A. Resistência do solo à penetração em resposta ao número de amostras e tipo de amostragem. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.32, n. 2, p.487-494, 2008. [Crossref](#)
- Vieira, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: Novais, R.F.; Alvarez V., V.H.; Schaefer, G.R. (Eds.). Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.1-54.