



**Variabilidade espacial da resistência do solo a penetração em área cultivada com cana-de-açúcar na safra 2008/2009**

*Spatial variability of soil resistance to penetration in the area cultivated with sugar cane in the 2008/2009 season*

**Martios Ecco<sup>1</sup>, Laércio Alves de Carvalho<sup>2</sup>, Lucas Ponciano Ferrari<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Estadual de Mato grosso do Sul (UEMS), U.U de Aquidauana, Rodovia Aquidauana/UEMS - Km 12 - CEP: 79200-00. E-mail: eccoagronomia@hotmail.com

<sup>2</sup>Universidade Estadual de Mato grosso do Sul (UEMS). Cidade Universitária de Dourados, Dourados, MS

<sup>3</sup> Universidade Estadual de Mato grosso do Sul (UEMS). U.U de Cassilândia, Cassilândia, MS

Recebido em: 12/04/2011

Aceito em: 10/09/2012

**Resumo.** Os indicadores físicos de qualidade do solo são parâmetros de avaliação nas possíveis mudanças ambientais no sistema solo-planta. A cana-de-açúcar é uma cultura de grande importância para o estado de Mato Grosso do Sul, e estudos que avaliam as possíveis alterações do solo a fim de auxiliar na sustentabilidade do sistema produtivo e do meio ambiente são de extrema importância. Neste sentido, o experimento teve como objetivo empregar técnicas geoestatísticas para o estudo da variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração (RMP), no sistema de manejo de colheita mecanizado de cana-de-açúcar, nas camadas 0 – 0,20 m e 0,20 – 0,40 m. O experimento foi realizado nas dependências da Usina ETH Bioenergia, município de Rio Brillante-MS, em Latossolo Vermelho argiloso. A parcela experimental no talhão foi constituída por uma malha experimental com 144 pontos. A determinação da RMP foi realizada através de um penetrômetro de impacto agrícola e a variabilidade espacial no solo e da RMP de cada camada do talhão de cana, foi determinado através das técnicas geoestatísticas. Foram confeccionados semivariogramas, e em seguida foram utilizados no processo de krigagem. Verificou dependência espacial de 176 m e 30 m, respectivamente para as camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m, conseqüentemente, a camada superior apresentou mais zonas homogêneas do que a camada inferior, de acordo com a RMP, podendo assim, ser adotado um manejo diferenciado entre estas camadas de solo.

**Palavras-chave.** Agricultura de precisão, compactação, *saccharum spp.*

**Abstract.** The physical indicators of soil quality evaluation parameters are the possible environmental changes in soil-plant system. The sugar cane is a crop of great importance for the state of Mato Grosso do Sul, and studies that assess the possible changes of soil to assist in the sustainability of the production system and environment are of utmost importance. In this sense, the experiment aimed to apply geostatistical techniques to study the spatial variability of the soil resistance to penetration (RMP), the management system of mechanized harvesting of cane sugar, in layers from 0 to 0.20 m and 0.20 to 0.40 m. The experiment was conducted at the Plant ETH Bioenergy, Rio Bright-MS, over an Oxisol. The experimental design in the plot consisted of 144 samples point over an experimental grid. The determination of the PMR was performed using an impact penetrometer. The spatial variability in soil and the RMP of each layer of the sugarcane field was determined using geostatistical techniques. The semivariograms were elaborated and applied to the kriging interpolation process. It was found that the dependence of 176 m and 30 m, respectively for the layers of 0-0.20 and 0.20-0.40 m RMP in the upper layer showed more homogeneous areas than the lower layer and can thus be adopted a different management systems between these layers of soil.

**Keywords.** Precision agriculture, compaction, *saccharum spp.*

**Introdução**

O Brasil mantém-se como maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, com uma produção de 23,96 bilhões de litros de etanol (substituindo cerca

de 40% da gasolina) e de 299,9 milhões de toneladas de açúcar além do uso quase total do bagaço para diversos fins (CONAB, 2011).



Ultimamente, nas áreas cultivadas com cana no Brasil, está sendo adotada a colheita sem queima prévia (colheita de cana verde), na qual restos vegetais são deixados na superfície do solo, na forma de folhas trituradas já que se prevalece em sua maioria a colheita mecanizada (Basanta et al., 2002; Timm, 2002).

A colheita de cana verde vem sendo adotada como prática principal nas regiões canavieiras do Brasil, sendo de fundamental importância conhecer a dinâmica desta nova prática, bem como observar as possíveis melhorias da qualidade física do solo (Timm, 2002).

Com o sistema de colheita mecanizada sem queima, reduz a emissão de gases poluentes deixando de poluir a atmosfera além de diminuir a erosão e o aumento do teor de matéria orgânica dos solos (SOUZA et al., 2006). Entretanto, este sistema pode provocar compactação do solo devido à maior intensidade de tráfego com máquinas, que altera negativamente a qualidade física do solo para o crescimento e desenvolvimento radicular da cultura da cana-de-açúcar (Cavaliere et al., 2011).

Os indicadores físicos de qualidade do solo são parâmetros utilizados para avaliar as possíveis mudanças ambientais no sistema solo-planta. Um desses indicadores é a resistência do solo à penetração, que se caracteriza como uma das propriedades físicas que está diretamente relacionada com o crescimento das plantas (Cunha et al., 2002) e modificada pelos sistemas de preparo do solo. Valores excessivos de resistência do solo à penetração podem influenciar o crescimento das raízes em comprimento e diâmetro (Merotto & Mundstock, 1999) e na direção preferencial do crescimento radicular.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a variabilidade espacial da resistência à penetração num solo Latossolo Vermelho argiloso, cultivado com cana-de-açúcar com colheita mecanizada.

### **Material e Métodos**

O experimento foi realizado nas dependências da Usina ETH Bioenergia S/A unidade Eldorado, município de Rio Brilhante-MS, a Usina está inserida na Bacia do Rio Paraná, e sub-bacia do Rio Ivinhema onde dispõe de 1.846 talhões em uma área total de 8.315 ha, sendo que a área utilizada no experimento apresenta em média 5% de declividade, com relevo plano a suavemente

ondulado, ou seja, dentro dos limites de mecanização.

O projeto foi desenvolvido num talhão de cana, no sistema de colheita mecanizada, em um Latossolo Vermelho argiloso.

A parcela experimental no talhão apresentou uma malha amostral com 144 pontos. A malha teve um comprimento de 180 m e uma largura de 200 m, perfazendo uma área total de aproximadamente 4,0 ha. A distribuição dos pontos dentro da área experimental foi realizada na forma de uma grade, com doze colunas e doze linhas, com os pontos distando de seu vizinho de 20 m no eixo Y e 18,2 m no eixo X.

O teste de resistência à penetração foi realizado no período de janeiro a fevereiro de 2009, após a colheita mecanizada da cana, utilizando um penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar, a qual foi calculada, conforme Stolf (1991), como se segue:

$$RMP = (5,6 + 6,89 \times N/(P-A) \times 10 \times 0,0981)$$

em que: RPM é a resistência mecânica do solo à penetração (MPa), N é o número de impactos efetuados com o martelo do penetrômetro para a obtenção da leitura, A e P são, respectivamente, as leituras antes e depois da realização dos impactos (cm).

A cada 5 marteladas foi anotado em uma planilha em que uma pessoa ficou responsável pela anotação a profundidade em que o penetrômetro atingiu (cm), posteriormente estes dados foram passados para uma planilha eletrônica, onde foram transformados para (MPa). As amostras para umidade do solo foram retiradas no momento da determinação da resistência do solo a penetração, utilizando-se o amostrador de uhlend. O conteúdo de água foi determinado segundo metodologia de Libardi (2005).

De posse dos valores de resistência a penetração em cada camada e no talhão de cana, foi aplicada as técnicas geoestatísticas para o estudo da variabilidade espacial.

Antes da aplicação das ferramentas geoestatísticas, os dados foram analisados inicialmente através dos procedimentos da análise estatística descritiva, para visualizar o comportamento geral dos dados e identificar possíveis valores discrepantes (Salviano, 1996).

As medidas estatísticas calculadas foram: média, mediana, desvio padrão, valor máximo e



mínimo, limite inferior e superior, amplitude total, amplitude interquartílica, coeficiente de assimetria e de curtose, coeficiente de variação, variância, teste paramétrico de normalidade de Shapiro-Wilk (W). Nos casos em que os atributos apresentaram valores discrepantes ("outliers") (Gomes et al., 2007), estes foram descartados e, foram aplicados novamente os procedimentos da análise descritiva. Em seguida realizou-se análise exploratória dos dados, pois possibilita verificar e descrever as medidas estatísticas e matemáticas dos dados o que, melhora a eficiência da análise estatística (Farias, 1999) e para auxiliar na decisão das hipóteses de estacionaridade que podem ser assumidas (Genú, 2004; Folegatti, 1996).

Foram construídos semivariogramas para analisar o grau de dependência espacial entre os 144 pontos por camada de solo no talhão, dentro da malha experimental, para definir parâmetros necessários para a estimativa de valores para locais não amostrados, através da técnica de interpolação por krigagem e validação cruzada (Salviano, 1996). Essa técnica é utilizada também para se obter um maior detalhamento da área em estudo onde é necessária a aplicação de um método de interpolação, como a krigagem. Isso porque, pode existir futuramente interesse em um ou mais pontos específicos da área. Com isso, neste trabalho foi

obtida uma malha de pontos interpolados que permitiram visualizar o comportamento das variáveis na região através de um mapa de isolinhas ou de superfície.

### Resultados e Discussão

Os valores de média, desvio-padrão, coeficiente de variação e curtose foram calculados em relação à variável resistência mecânica do solo a penetração, procurando-se ajustar os dados as distribuição normal ou log-normal, com nível de significância inferior ou igual a 5%, escolhendo a distribuição de frequência que melhor se ajusta.

$$K = (Q3 - Q1) / 2 \cdot (P90 - P10), \text{ onde:}$$

K = Coeficiente percentílico de curtose

Q3 e Q1 = terceiro e primeiro quartil

P90 e P10 = nonagésimo e décimo ponto

Na Tabela 1 encontram-se os valores obtidos para as medidas estatísticas descritivas das variáveis RMP (MPa) para ambas camadas do solo estudado.

Em relação aos valores da média e mediana, observa-se na Tabela 1, que em todas as profundidades, a razão média/mediana está acima de 1.

**Tabela 1.** Resumo estatístico para a variável RMP (MPa) nas camadas de solo 0-0,20 e 0,20-0,40 m para a área de estudo.

Medidas estatísticas	0 – 0,20 m	0,20 – 0,40 m
Média	4,04	5,09
Mediana	3,94	5,07
Máximo	8,59	7,61
Mínimo	2,23	2,74
Quartil superior	4,42	5,6
Quartil inferior	3,39	4,45
Variância	1,04	0,77
Desvio padrão	1,02	0,87
Coeficiente de Variação (%)	25	17
Curtose	3,78	0,15

Nas duas camadas estudadas o modelo de semivariograma baseando-se na auto validação foi o esférico (Tabela 2).

O efeito pepita foi e é um parâmetro importante no semivariograma indicando uma variabilidade não explicada considerando a distância de amostragem utilizada (Ferraz et al., 2012). Esse

parâmetro pode ser expresso como percentagem do patamar, e teve por objetivo facilitar a comparação do grau de dependência espacial das variáveis em estudo.

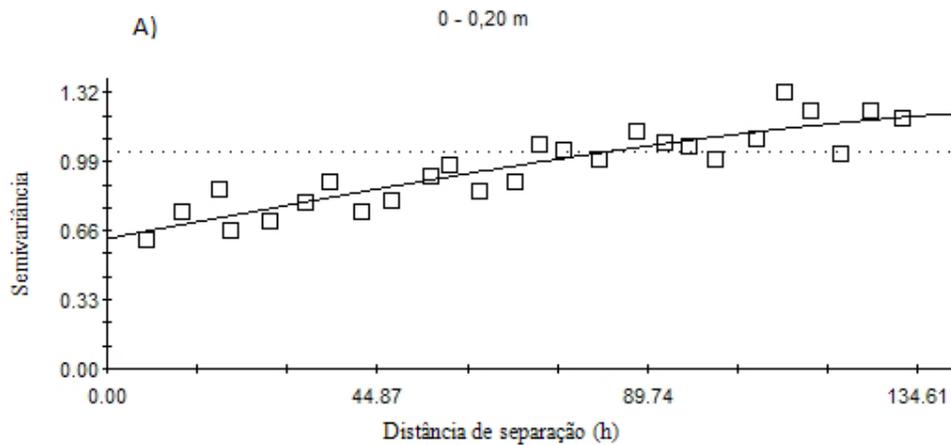
O alcance indicou a distância limite entre pontos correlacionados entre si. Pontos coletados com distância maiores que o alcance é independente

e, para sua análise, pode-se utilizar a estatística clássica (Vieira, 2000). As variáveis em estudo apresentaram alcances da ordem de 176 m para resistência do solo à penetração na profundidade de 0 - 0,20 m (Figura 1), e 30 m para a camada 0,20 - 0,40 m (Figura 2).

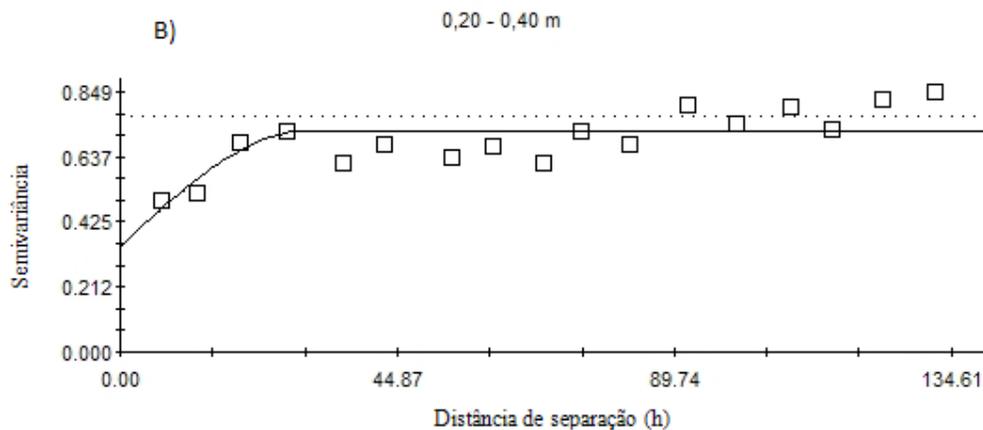
**Tabela 2.** Valores dos parâmetros de semivariogramas ajustados nas duas profundidades estudadas (0 - 0,2 m e 0,2 - 0,4 m) para a área de estudo.

Profundidade (m)	Modelo	C	Co+C:	Ao	r <sup>2</sup>	r <sup>2</sup> *
0,0 - 0,20	esférico	0,62300	1,26200	176,70	0,820	0,959
0,20 - 0,40	esférico	0,34500	0,72200	30,30	0,487	0,571

CO - Efeito pepita; C+CO - Patamar; Ao - Alcance; r<sup>2</sup> - coeficiente de correlação do modelo ajustado; r<sup>2</sup>\* - coeficiente de correlação do teste de validação cruzada.



Modelo esférico (Co = 0.62300; Co + C = 1.26200; Ao = 176.70; r<sup>2</sup> = 0.820; RSS = 0.159)

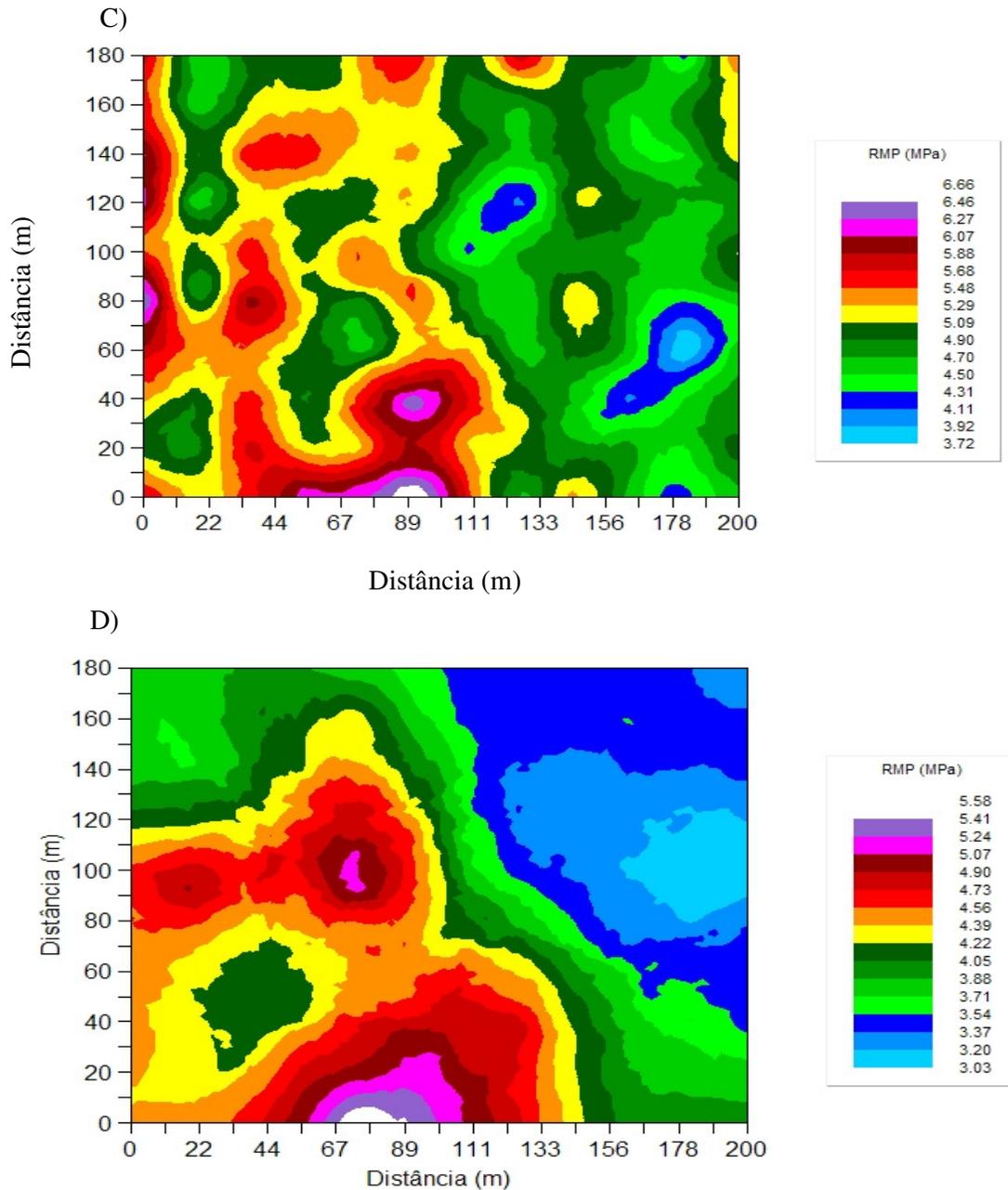


Modelo esférico (Co = 0.34500; Co + C = 0.72200; Ao = 30.30; r<sup>2</sup> = 0.487; RSS = 0.0813)

**Figura 1.** Semivariograma experimental e modelado para a variável RMP (MPa) na camada de solo. A) 0 - 0,20 m e B) 0,20 - 0,40 m na área de estudo.

Os valores mínimos de RMP variaram de 3,03 à 3,72 MPa, enquanto os valores máximos variaram de 5,58 à 6,66 MPa. Segundo Camargo e Alleoni (1997) valores acima de 2,5 MPa começam a restringir o pleno crescimento das raízes das

plantas; Sene et al. (1985), citados pelos mesmos autores, consideram críticos os valores que variam de 6,0 a 7,0 MPa para solos arenosos e em torno de 2,5 MPa para solos argilosos.



**Figura 2.** Distribuição espacial para a variável RMP (MPa) na camada de solo. C) 0 - 0,20 m e D) 0,20 - 0,40 m na área de estudo.



Na Figura 2 observa-se a distribuição dos valores de RMP nas duas camadas de solo. Na camada de 0 – 0,20 m a maiorias dos valores de RMP estão concentrados na faixa de 3,39 a 4,42 MPa, ou seja, mesmo que o valor máximo seja de 6,66 MPa, ele não representa a maioria encontrada na área estudada. Nesse caso em que a variável estudada apresentou um valor discrepante ("outliers"), esse poderia ter sido descartado e, nessa situação, poderia ser aplicada novamente os procedimentos da análise descritiva sem valores discrepantes. Na camada de 0,20 – 0,40 m a maiorias dos valores de RMP estão concentrados na faixa de 4,45 à 5,6 MPa, ou seja, poderia tomar outro procedimento para esta camada, considerando que ele representa a maioria dos valores encontrados na área estudada.

Vale ressaltar que esses valores mínimos e máximos para a variável RMP em todas as camadas do solo estão fora do intervalo dado pelos quartis inferior e superior, sugerindo possíveis candidatos a valores discrepantes (Tabela 1). Segundo Libardi et al. (1996) a decisão de excluí-los deve ser tomada após confrontar os candidatos a valor extremo com seus vizinhos mais próximos nos gráficos de distribuição espacial ("postplot").

Mesmo os valores máximos encontrados na área estudada sejam discrepantes, a análise descritiva mostrou uma tendência de aumento da RMP em profundidade, pois a concentração de valores passou de 3,39 a 4,42 MPa, na camada de 0 – 0,20 m, para 4,45 à 5,6 MPa na camada de 0,20 – 0,40 m. Este resultado provavelmente tenha ocorrido em consequência do sistema de colheita mecanizado que exerce uma pressão no solo, provocando a compactação, principalmente nas camadas subsuperficiais. Segundo Reichert et al. (2003) o plantio direto modifica as condições do solo, em taxas e direções diferentes das observadas em sistemas de manejo que incluem o seu revolvimento. O solo é minimamente revolvido e o aporte de resíduos na superfície induz aumento da matéria orgânica (Bayer & Mielniczuk, 1997), a qual, associadas às raízes em decomposição, proporciona recuperação da estrutura do solo e maior distribuição e continuidade dos poros. Assim, a infiltração da água no solo pode aumentar e, conseqüentemente, o armazenamento. No entanto, a ausência de revolvimento do solo, associada à maior intensidade de uso da terra, expõe o solo a intenso tráfego de máquinas em condições inadequadas de umidade e contribui para alterar a qualidade

estrutural do solo, o que acarreta aumento da compactação em muitas áreas manejadas sob esse sistema.

### Conclusões

Houve dependência espacial de 176 m e 30 m, respectivamente para as camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m. As duas camadas de solo apresentaram valores de RMP acima de 2,0 MPA.

### Referências

BASANTA, M.V.; DOURADO NETO, D.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.; OLIVEIRA, J.C.M.; TRIVELIN, P.C.O.; TIMM, L.C.; TOMINAGA, T.T.; CORRECHEL, V.; CÁSSARO, F.A.M.; PIRES, L.F.; MACEDO, J.R. Eficiência no uso de nitrogênio em relação aos manejos resíduos da cultura de cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇÚCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL., **Anais...** 8., 2002, Recife. Piracicaba: STAB, 2002. p. 268-275.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, p.105-112, 1997.

CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba, 1997. 132p.

CAVALIERI, K.M.V.; CARVALHO, L.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L.; TORMENA, C.A. Qualidade física de três solos sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.1541-1549, 2011.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de safra brasileira: Cana-De-Açúcar, Safra 2011/2012 Primeiro Levantamento - Maio/2011- Companhia Nacional de Abastecimento. - Brasília: Conab 2011. Disponível em: [www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11\\_05\\_27\\_11\\_53\\_13\\_boletim\\_cana\\_portugues\\_mai\\_2011\\_lo\\_lev..pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_05_27_11_53_13_boletim_cana_portugues_mai_2011_lo_lev..pdf). Acesso em: 16-05-12.**

CUNHA, DA J.P.A.R.; VIEIRA, L.B.; MAGALHÃES, A.C. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes densidades e teores de



- água. **Engenharia na Agricultura**, v.10, n.1-4, Jan./Dez., 2002.
- FARIAS, M.S.S. **Diagnóstico da necessidade de drenagem no perímetro irrigado de São Gonçalo**. 1999. 75f. Dissertação (Mestrado em Manejo e Conservação do Solo) – Universidade Federal de Paraíba, Paraíba, Campina Grande, 1999.
- FERRAZ, G.A.E.S.; SILVA, F.M.; CARVALHO, L.C.C.; ALVES, M.C.; FRANCO, B.C. Variabilidade espacial e temporal do fósforo, potássio e da produtividade de uma lavoura cafeeira. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.32, n.1, p.140-150, jan./fev. 2012.
- FOLEGATTI, M.V. **Estabilidade temporal e variabilidade espacial da umidade e do armazenamento de água em solo siltoso**. 1996. 84f.. Tese (Livre – Docência em Irrigação) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.
- GENÚ, A.M. **Geoestatística multivariada**. Departamento de Ciências Exatas. Universidade de São Paulo. Apostila, 17 p. Piracicaba, julho de 2004.
- GOMES, N.M.; SILVA, A.M.; MELLO, C.R.; FARIA, M.A.; OLIVEIRA, P.M. Métodos de ajuste e modelos de semivariograma aplicados ao estudo da variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.435-443, 2007.
- LIBARDI, L.P.; MANFRON, P.A.; MORAES, S.O.; TUON, R.L. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, SP, v.20, p.1-12, 1996.
- LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Editora Edusp, 2005. 335p.
- MEROTTO, A.; MUNDSTOCK, C.M. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.197-202, 1999.
- REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, v.27, p.29-48, 2003.
- SALVIANO, A.A.C. **Variabilidade de atributos do solo e de *Crotalaria juncea* em solo degradado do município de Piracicaba-SP**. 1996. 91f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.
- SENE, M.; VEPRASKAS, M.J.; NADERMAN, G.C. & DENTON, H.P. Relationships of soil texture and structure to corn yield response to subsoiling. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v 49, p. 422-427, 1985.
- SOUZA, Z.M.; BEUTLER, A.N.; PRADO, R.M.; BENTO, M.J.C. Efeito de sistemas de colheita de cana-de-açúcar nos atributos físicos de um Latossolo Vermelho. **Científica**, Jaboticabal, v.34, n.1, p. 31-38 2006.
- STOLF, R. Fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em força/unidade de área. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 19, 1990, Piracicaba. **Anais...** v.2, p.823-836.
- TIMM, L.C. **Efeito do manejo da palha da cana-de-açúcar nas propriedades físico-hídricas de um solo**. 2002. 127 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Universidade de São Paulo, 2002.
- VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F. et al. (Eds). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.1-53.