Resistência mecânica do solo à penetração (RMP) sob cultivo de cana-de-açúcar, no município de Rio Brilhante-MS

Resistance mechanics of the soil to penetration (RMP) under cane-of-sugar culture, in the city of Rio Brilhante-MS

Laércio Alves de Carvalho[1], Valdemar J. M. Neto[2], Luciana Ferreira da Silva[3], Joelson Gonçalves Pereira[4], Walder Antonio G. de A. Nunes[5], Carolina Hengler Correa Chaves[6]

[1] Engenheiro Agrônomo, Doutor, Professor Adjunto do Curso de Agronomia da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul. Unidade Universitária de Dourados. Rodovia Dourados Itahun, Km 12. CEP: 79 800 – 000. Dourados – MS.

E-mail: lcarvalh@uems.br. Autor para correspondência.

[2] Graduando em Agronomia da Unidade Universitária de Cassilândia - Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul – UEMS.

[3] Licenciatura em Matemática, Doutorado em Economia Aplicada, Professor Adjunto da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul. Unidade Universitária de Dourados.

[4] Professor Doutor do Curso de Gestão da Universidade Federal da Grande Dourados. Unidade Universitária de Dourados.

[5] Pesquisador Doutor da EMBRAPA AGROPECUÁRIA OESTE - Dourados/MS.

[6] Engenheira Agrônoma, Trainee da Usina ETH Bioenergia, Rio Brilhante-MS.

Recebido: 01/08/2008 Aceito: 10/12/2008

Resumo*: O objetivo deste estudo foi avaliar a variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração (RMP) e do conteúdo de água do solo, em área sob sistema de manejo de colheita mecanizado de cana-de-açúcar. O experimento foi realizado nas dependências da Usina ETH Bioenergia, no município de Rio Brilhante-MS, num talhão de cana, no sistema de colheita mecanizado, em Latossolo vermelho argiloso, nas camadas 0-0,10 m; 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m. A parcela experimental no talhão foi constituída por uma malha experimental com 144 pontos, apresentando um comprimento de 180 m e uma largura de 200 m. As coletas das amostras de solo foram realizadas em fevereiro de 2008, após a colheita da cana. Para determinação da RMP utilizou-se um penetrômetro de impacto agrícola. Amostras indeformadas foram retiradas, para determinação do conteúdo de água no solo, no Laboratório de Solos da Embrapa Agropecuária Oeste (CPAO). Foram utilizadas técnicas geoestatísticas (semivariograma), para estudo da variabilidade espacial do conteúdo de água no solo e da RMP. Os resultados mostraram que valores de RMP no solo estudado aumentaram em profundidade, variando de 1,22 a 11,36 MPa; 1,22 a 13,39 MPa e 2,57 a 15,41 MPa, nas três camadas estudadas e não se correlacionaram o conteúdo de água do solo.*

Palavras-chave*: agricultura de precisão, compactação, densidade do solo, Saccharum spp.*

Abstract: *The objective of this study was to evaluate the space variability of the resistance mechanics of the soil to the penetration (RMP) and of the water content of the soil, in area under system of mechanized handling of cane-of-sugar harvest. The experiment was carried through in the dependences of Plant ETH Bioenergia, in the city of Rio Brilhante, in a block of sugar cane, the mechanized system of harvest, argillaceous red Latossolo, the layers 0-0,10 m; 0,10-0,20 m and 0,20-0,30 m. The experimental parcel in the block was constituted by an experimental mesh with 144 points, having presented a length of 180 m and a width of 200 m. The collections of the soil samples had been carried through in February of 2008, after the harvest of the sugar cane. For determination of the RMP one was used penetrometer of agricultural impact. Unbroken samples had been removed, for determination of the water content in the soil, in the Soil Laboratory of Embrapa Agropecuária Oeste (CPAO). Geoestatístiques (semivariograms) techniques had been used, for study of the space variability of the water content in the soil and of the RMP. The results showed that values of RMP in the studied soil increased in depth, varying of 1,22 to 11,36 MPa; 1,22 at 13,39 MPa and 2,57 to 15,41 MPa, in the three studied layers and they were not correlated the water content of the soil.*

Key-words*: agriculture of precision, compacting, density of the soil, Saccharum spp.*

Introdução

A produtividade de solos é função, também, de alguns atributos que promove o crescimento de raízes, infiltração e movimento de água no perfil do solo, trocas gasosas, atividade biológica e mineralização de carbono. Todos esses atributos são, em parte, relacionados a propriedades e processos físicos do solo (BURGER & KELTING, 1999).

A estimativa da produção nacional de cana-de-açúcar destinada à indústria sucroalcooleira é de 475,07 milhões de toneladas, das quais 47,0% (223,48 milhões de toneladas) são para a fabricação de açúcar e 53,0% (251,59 milhões de toneladas) são para a produção de álcool. Quando comparada à safra 2006/07, verifica-se um crescimento de 10,62% (45,60 milhões de toneladas). No Norte/Nordeste, o aumento foi de 11,24% (6,23 milhões de toneladas). O referido aumento foi em função das boas condições climáticas, dos bons tratos culturais, da irrigação e da introdução de novas variedades mais produtivas. No Centro-Sul verifica-se um incremento de 10,52% (39,37 milhões de toneladas). Do total de cana-de-açúcar destinada ao setor sucroalcooleiro, São Paulo esmagará 58,55% (278,18 milhões de toneladas); o Paraná 8,47% (40,22 milhões de toneladas); Minas Gerais 7,67% (36,46 milhões de toneladas); Alagoas 5,63% (26,74 milhões de toneladas) Goiás 4,43%(21,06 milhões de toneladas) e Pernambuco 3,71% (17,61 milhões de toneladas (CONAB, 2008). A produção nacional de açúcar está estimada em 29,65 milhões de toneladas, 1,91% (576,4 mil toneladas) inferior à da safra 2006/07. Desse total, a região Centro-Sul participa com 84,50% (25,05 milhões de toneladas) e a Norte/Nordeste com 15,50% (4,60 milhões de toneladas).

A colheita tradicional da cana inclui a retirada de palhada com fogo para facilitar as operações de corte e carregamento durante a colheita manual. Esse manejo, incluindo a queima, apresenta vantagens operativas e econômicas, porém, do ponto de vista técnico, apresenta a limitação de eliminar um grande volume de material orgânico que poderia ser deixado na superfície do solo, contribuindo para manter os teores de matéria orgânica (DELGADO, 1985). A partir do ano de 1997, a agroindústria sucroalcooleira no Estado de São Paulo, que é o principal estado produtor brasileiro de cana-de-açúcar, adaptou o sistema de colheita sem a queima prévia. Este sistema vem sendo adotado em todas as regiões produtoras de cana-de-açúcar, principalmente pelos benefícios diretos sobre o solo.

A colheita de cana crua, sem queima, melhora a produtividade, fornece à indústria uma matéria-prima de melhor qualidade e proporcionando ainda, preservação do ambiente. Entre os diversos aspectos que merecem avaliação, em diferentes condições de solo, clima, variedade de cana e ciclo da cultura, têm-se as transformações das propriedades físicas do solo. Segundo Assis & Lanças (2005) o aumento do tempo e uso do solo, modificam os seus atributos físicos, necessitando, portanto, de pesquisas com períodos de duração mais longos para estudar melhor os fenômenos ligados à estrutura.

A colheita de cana verde deverá ser 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, principalmente para avaliar os efeitos deste novo sistema de colheita na compactação do solo.

A compactação do solo pelo uso de práticas inadequadas de manejo resultam diretamente em aumento na densidade do solo (Ds) e, por conseqüência, em alterações detrimetais em outras propriedades físicas, tais como: a porosidade do solo, a retenção de água, a aeração e a resistência do solo á penetração das raízes (LETEY, 1985). Hill *et al.* (1985) mencionam que, mesmo com o aumento da Ds, os preparos com o mínimo revolvimento podem proporcionar maior quantidade de água disponível as plantas quando comparados ao preparo convencional, apesar de tais efeitos variarem com a textura e com o teor de matéria orgânica dos solos. Outros autores argumentam que, nestes sistemas, a compactação ocasionada pelo tráfego de máquinas resulta em maiores valores de Ds e resistência do solo à penetração e em menores valores de macroporosidade (WATANABE *et al.*, 2002), com impactos negativos na produtividade dasculturas.

Letey (2005) considera a resistência do solo à penetração uma das propriedades físicas diretamente relacionada com o crescimento das plantas 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 (IIJIMA & KONO, 1991).

A resistência do solo à penetração (RP) constitui uma das variáveis físicas consideradas na avaliação da qualidade do solo, podendo pode apresentar grande variabilidade espacial. Os estudos de variabilidade espacial da RP têm sido realizados em um único momento em áreas de sistema convencional (GREGO & VIEIRA, 2005) ou no sistema plantio direto (ABREU *et al*., 2003; SILVA *et al*., 2004).

Ao analisar dados de atributos de solo mediante os métodos estatísticos clássicos são ignoradas as conseqüências da heterogeneidade espacial sobre a representatividade dos valores médios de amostras. No entanto, os métodos geoestatísticos (análise de semivariogramas e krigagem) estão sendo utilizados para analisar tanto a dependência espacial como para interpolar atributos de solo através da krigagem (VIEIRA *et al*., 1983; TRANGMAR *et al*., 1985; SOUZA *et al*., 2001; SOUZA *et al*., 2004). Este procedimento permite determinar se um atributo apresenta ou não estrutura espacial e, uma vez conhecido o modelo da dependência espacial, é possível mapear a área estudada. Diversos estudos demonstram que a variabilidade da resistência do solo à penetração e o teor de água no solo não ocorrem ao acaso, mas apresentam correlação ou dependência espacial (SOUZA *et al*., 2001; USTED & CID, 2001; ABREU *et al*., 2003; MERCANTE *et al*., 2003). Para diferentes condições de teores de água no solo, distintos comportamentos da variabilidade espacial da resistência do solo à penetração foram observados por Usted & Cid (2001).

Considerando a importância da cana-de-açúcar para o estado de Mato Grosso do Sul (MS), com grandes perspectivas de expansão territorial, é de extrema relevância estudos que avaliem as possíveis alterações do solo a fim de auxiliar na sustentabilidade do sistema produtivo e do meio ambiente. O trabalho teve como primeiro objetivo avaliar a variabilidade espacial da resistência à penetração num solo de cerrado, no sistema de manejo de colheita mecanizado de cana-de-açúcar. O segundo objetivo foi utilizar técnicas geoestatísticas com intuito de observar os diferentes locais de variabilidade espacial das variáveis relacionadas ao sistema solo-planta.

Material e Métodos

O experimento foi realizado em fevereiro de 2008, num talhão de cana da Usina ETH Bioenergia, localizada no município de Rio Brilhante-MS, com as coordenadas geográficas, 21º 51' 32.70389" Lat. e 54º 01' 25.40887" Long. O clima do município de Rio Brilhante-MS é tropical, caracterizando-se por apresentar um inverno seco. O projeto foi desenvolvido num talhão de cana, no sistema de colheita mecanizado, num Latossolo Vermelho argiloso (EMBRAPA, 1999), representando aproximadamente 8 ha. A área experimental dentro do talhão era de 200 X 180 m, perfazendo uma área total de aproximadamente 4,0 ha. Em cada ponto da malha foram coletadas amostras de solo até a profundidade

de 0,30 m para posterior determinação do conteúdo de água a base de volume. 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.

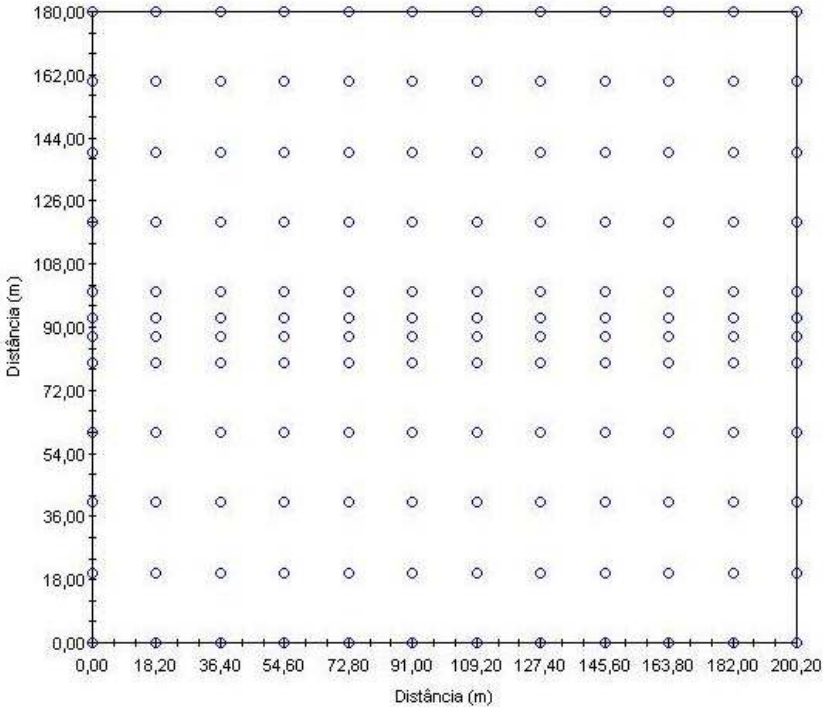

Figura 1. Distribuição dos 144 pontos amostrados na área experimental do talhão de cana-de-açúcar. Rio Brilhante-MS. 2008.

Os atributos físicos analisados foram: conteúdo de água a base de volume (θ) e resistência mecânica do solo a penetração (RMP). Esta determinação foi realizada em fevereiro de 2008, após a colheita da cana, nas camadas de 0 - 0,10m; 0,10 – 0,20 m e 0,20 – 0,30 m. Para determinação do conteúdo de água a base de volume (θ), foram coletadas amostras indeformadas, utilizando-se amostrador de Uhland, sendo armazenadas em recipientes de alumínio e posteriormente analisadas para determinação do conteúdo de água a base de volume. As amostras foram acondicionadas em recipiente de alumínio, protegi-

das com papel alumínio e armazenadas na geladeira, visando evitar perda de água. Esse procedimento foi realizado no Laboratório de Solos da Embrapa Agropecuária Oeste, Dourados-MS.

Para o teste de resistência mecânica do solo à penetração (RMP), nas três camadas de solo, utilizou-se um penetrômetro de impacto modelo IAA/ Planalsucar, a qual foi calculada, conforme Stolf (1991), como se segue:

$$RMP = (5,6 + 6,89 \times ((N/(P-A) \times 10) \times 0,0981)) \quad (1)$$

Onde:

RMP = resistência mecânica do solo à penetração (MPa)

N = número de impactos efetuados com o martelo do penetrômetro para a obtenção da leitura

A e P = leituras antes e depois da realização dos impactos (cm)

Para se obter uma melhor representatividade da área, este teste foi realizado próximo ao ponto amostral numa distância de 10 cm do ponto.

Para determinação do conteúdo de água a base de volume nas três camadas de solo, utilizou-se anéis de alumínio, com 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura. Em seguida, a amostra de solo úmido foi pesada e posteriormente seca numa estufa com temperatura de 105 ºC, por 24 horas.

O conteúdo de água a base de massa foi determinado pela seguinte equação

$$\theta = \left(\frac{Mu - Ms}{Ms}\right) x ds \quad (2)$$

onde:

θ = conteúdo de água a base de volume $\left(m^3 m^{-3}\right)$

Mu = massa de solo úmido (*g*);

Ms = massa de solo seco a 105º C durante 24 horas (*g*)

Ds = densidade do solo $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$

De posse dos valores de conteúdo de água a base de volume e resistência mecânica do solo a penetração em cada camada do talhão estudado, foram aplicadas as técnicas geoestatísticas para o estudo da variabilidade espacial.

Inicialmente foi realizada a análise estatística descritiva dos dados de RMP e conteúdo de água a base de volume, para visualizar o comportamento geral dos dados e identificar possíveis valores discrepantes (SALVIANO, 1996).

Em seguida foram confeccionados semivariogramas das variáveis estudadas, procurando observar o grau de dependência espacial entre os 144 pontos, seguindo metodologia de Vieira *et al.* 1998. Procurando verificar a normalidade da distribuição dos dados foi aplicado o teste de Shapiro e Wilk (1965), o qual foi proposto para amostras $n \leq 50$ (LAWLESS, 1982), e que se aplicou muito bem ao conjunto de dados obtidos neste trabalho. Para finalizar foi aplicada a técnica de interpolação, krigagem (SILVA JUNIOR, 2001). Assim, foi possível obter uma malha de pontos interpolados das duas variáveis estudadas, identificando possíveis locais com problemas e compactação.

Resultados e Discussão

Nas Tabelas 1 e 2 são apresentados os valores obtidos para as medidas estatísticas descritivas das variáveis estudadas para todas as camadas do solo. Os resultados mostraram que as camadas de solo não apresentaram uma distribuição normal paras as duas variáveis estudadas, a 5% de significância, visto que o valor de Prob<W, p é foi sempre menor que 0,05.

Tabela 1. Análise estatística dos valores de Resistência mecânica do solo a penetração (MPa) nas camadas de 0 – 0,10 m; 0,10 – 0,20 m e 0,20 – 0,30 m na área estudada. Rio Brilhante-MS, 2008.

Medidas estatísticas	0 – 0,10 m	0,10 – 0,20 m	0,20 – 0,30 m
Média	3,51	6,38	7,86
Mediana	2,57	5,95	7,30
Máximo	11,36	13,39	15,41
Mínimo	1,22	1,22	2,57
Quartil superior	4,60	8,66	9,33
Quartil inferior	1,90	3,92	5,95
Variância	4,32	8,64	6,21
Desvio padrão	2,07	2,93	2,49
Coef. Variação (%)	58,9	45,9	31,67
Curtose	1,26	- 0,64	0,44

Em relação aos valores da média e mediana observa-se na Tabela 1 que em todas as profundidades, a razão média/mediana está acima 1. Eguchi *et al.* (2003) em estudo feito para avaliar a variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado, obtiveram valores diferentes das medidas de tendência central (média, mediana), tanto para (Ko), quanto para (VIB), caracterizando-se uma distribuição assimétrica, conforme constatado também por Costa Neto (1990) e Libardi *et al.* (1996). Ao contrário dos valores de RMP, observa-se na Tabela I que a razão média/mediana está semelhante a 1, o que possivel-

mente comprova uma tendência de normalidade dos dados.

Tabela 2. Análise estatística dos valores de conteúdo de água no solo ($m^3 m^{-3}$) nas camadas de 0 – 0,10 m; 0,10 – 0,20 m e 0,20 – 0,30 m na área estudada. Rio Brilhante-MS, 2008.

Medidas estatísticas	0 – 0,10 m	0,10 – 0,20 m	0,20 – 0,30 m
Média	0,26	0,24	0,25
Mediana	0,26	0,25	0,25
Máximo	0,53	0,43	0,47
Mínimo	0,20	0,07	0,14
Quartil superior	0,28	0,28	0,27
Quartil inferior	0,24	0,22	0,23
Variância	0,00	0,00	0,00
Desvio padrão	0,03	0,04	0,03
Coef. Variação (%)	11,53	16,66	12
Curtose	24,52	2,34	9,96

Os valores mínimos de RMP variaram de 1,22 à 2,57 MPa, enquanto os valores máximos variaram de 11,36 à 15,41 MPa. Segundo Camargo & Alleoni (1997) valores acima de 2,5 MPa começam a restringir o pleno crescimento das raízes das plantas; já 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. Lima *et al.* (1999) observaram que onde o preparo do solo foi feito no sistema convencional houve um acréscimo de valores de resistência mecânica do solo à penetração, principalmente, entre as profundidades de 10 - 15 cm. Neste mesmo trabalho, o cultivo mínimo apresentou uma resistência à penetração em torno de 6,5 MPa, na profundidade de 15 cm de solo.

Vale ressaltar que os 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 I). 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*"), que pode ser gerado no programa Surfer (GOLDEN SOFTWARE, 1995).

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 0 – 6 MPa, na camada

de 0 – 0,10 m, para 4 – 12 MPa na camada de 0,20 – 0,30 m. Este resultado provavelmente tenha ocorrido em conseqüência 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. Os resíduos que permanecem na superfície do solo dissipam a energia cinética das gotas da chuva e proporcionam maior percurso ao escoamento da água de superfície (SEGANFREDO *et al.*, 1997). 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.

Oliveira *et al.* (2004) observaram em experimento com compactação do solo que a maior retenção de água ocorreu também até a profundidade de 20 cm. Segundo os autores o solo cultivado sofreu redução na macroporosidade e aumento na porosidade de retenção de água, em toda a profundidade analisada, concordando com Bertol *et al.* (2001), trabalhando em um Cambissolo Húmico.

Observando a Tabela 2 os valores mínimos variaram de 0,07 a 0,20 ($m^3 m^{-3}$), enquanto os valores máximos variaram de 0,43 à 0,53 ($m^3 m^{-3}$). Semelhante aos resultados de RMP, esses valores mínimos e máximos para a variável conteúdo de água a base de volume em todas as camadas do solo estão fora do intervalo dado pelos quartis inferior e superior, sugerindo possíveis candidatos a valores discrepantes (Tabela 2). Ao contrário dos resultados da RMP, em que os valores aumentaram com a profundidade, a maior concentração dos valores de conteúdo de água a base de volume se manteve em 0,20 e 0,30 ($m^3 m^{-3}$) em todas as camadas (Tabela 3). Este resultado mostra que a umidade não influenciou nos valores de RMP, sendo assim, os elevados valores de RMP encontrados na área estudada devem estar associados a densidades elevadas ou até mesmo a compactação do solo, podendo comprometer a produtividade da cana em cortes sucessivos.

Tabela 3. Correlação entre os valores de Resistência mecânica do solo a penetração e conteúdo de água do solo das camadas estudadas. Rio Brilhante-MS, 2008.

Camadas (m)	0 – 0,10	0,10 – 0,20	0,20 – 0,30
0 – 0,10	0,00		
0,10 – 0,20		- 0,08	
0,20 – 0,30			0,00

Para os dados das variáveis estudadas, em todas as camadas os coeficientes de curtose foram negativos ou positivos, não apresentando um comportamento perfeitamente normal. Isso indica um comportamento que na curva de distribuição, a assimetria pode não ter sido afetada por valores extremos não existindo a necessidade de substituí-la por outra medida de tendência central (WEBSTER, 1985). Porém, para a variável conteúdo de água a base de volume nas camadas de 0 – 0,10 e 0,20 – 0,30 m, onde foram encontrados os maiores valores de curtose, 24,52 e 9,96, respectivamente, a assimetria pode ter sido afetada pelos valores extremos, e essa interferência pode ser melhor visualizada na Figura 2.

Faulin (2005) em seu estudo com variabilidade espacial do teor de água no solo e sua influência na condutividade elétrica, observou valores de curtose altos, porém esses valores caracterizaram-se numa distribuição normal. Segundo o autor, a amostra possuía um grande número de dados e um pequeno número de valores extremos perante o total de dados.

Após o cálculo do semivariograma experimental, foi realizado um ajuste sobre a nuvem de pontos, obtendo-se um semivariograma modelado. Neste estudo, considerou-se um comportamento isotrópico sendo avaliado para 0º na direção das abscissas. Para todas as camadas de solo foram elaborados semivariogramas das variáveis RMP e conteúdo de água a base de volume que estão apresentados a seguir na Figura 3. Outros modelos ajustados com seus respectivos parâmetros, porém não obtiveram bons ajustes para essas variáveis. No comportamento típico de um semivariograma ajustado, o valor de semivariância aumenta à medida que aumenta a distância de separação entre os pontos, até estabilizar-se, ou seja, atingir um patamar (SILVA JUNIOR, 2001).

Para nenhuma das profundidades estudadas foi avaliada a anisotropia, realizando-se todas as análises geoestatísticas utilizando-se semivariogramas omnidirecionais, nos quais apenas a distância de separação entre as amostras é importante no cálculo da função semivariância e não o vetor entre as mesmas.

Pode-se observar na Figura 3 que todas as camadas apresentaram efeito pepita nulo, indicando que em distâncias de separação pequenas entre os pontos a variabilidade é pequena, o que significa que para esse parâmetro a distância de estudo foi adequada. Além disso, o melhor modelo ajustado foi o esférico concordando com Baio (2001) e Ortiz (2003), todos relatando que o modelo esférico apresentou o melhor ajuste para os semivariogramas ajustados, em seus respectivos trabalhos.

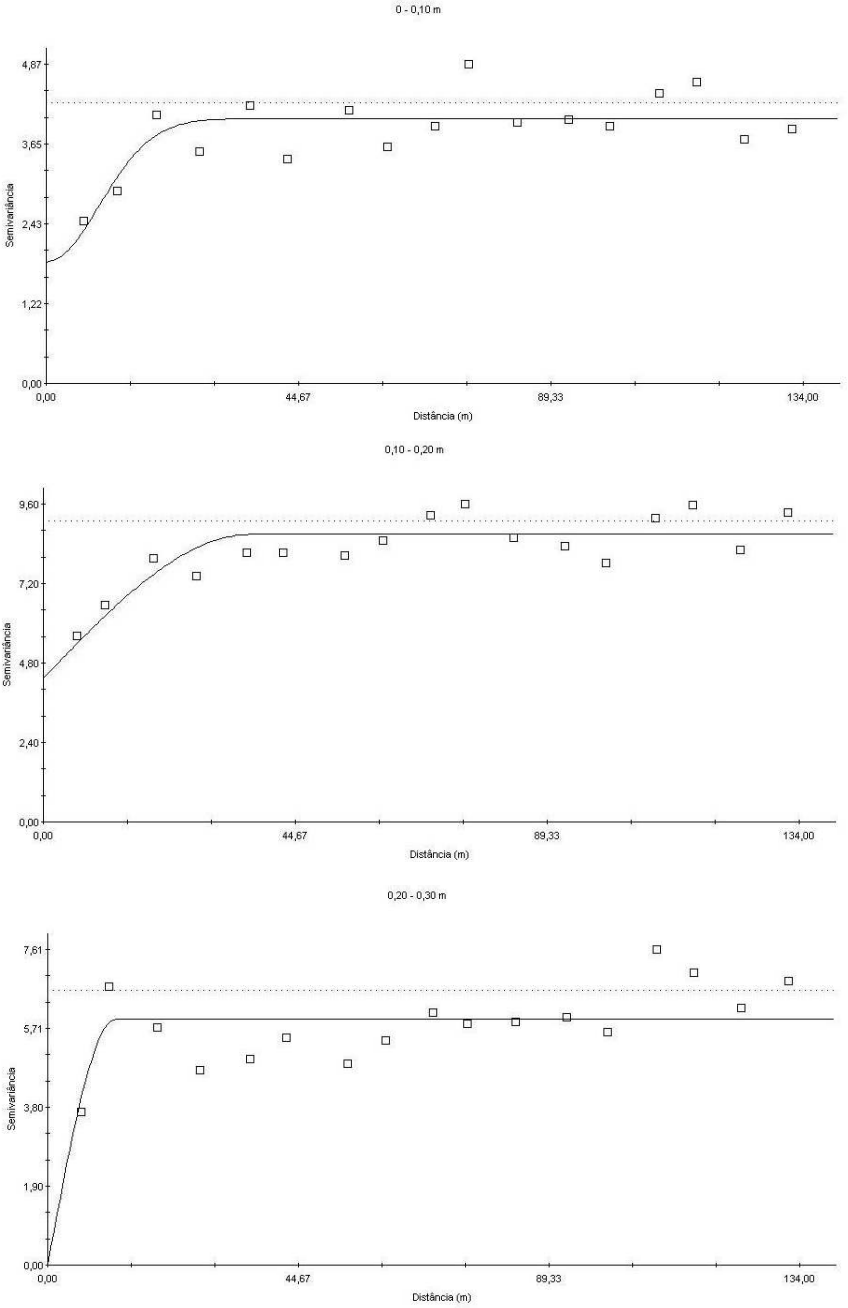

Figura 2. Semivariogramas experimentais e modelados para a variável Resistência mecânica do solo a penetração (MPa) das camadas estudadas. Rio Brilhante-MS, 2008.

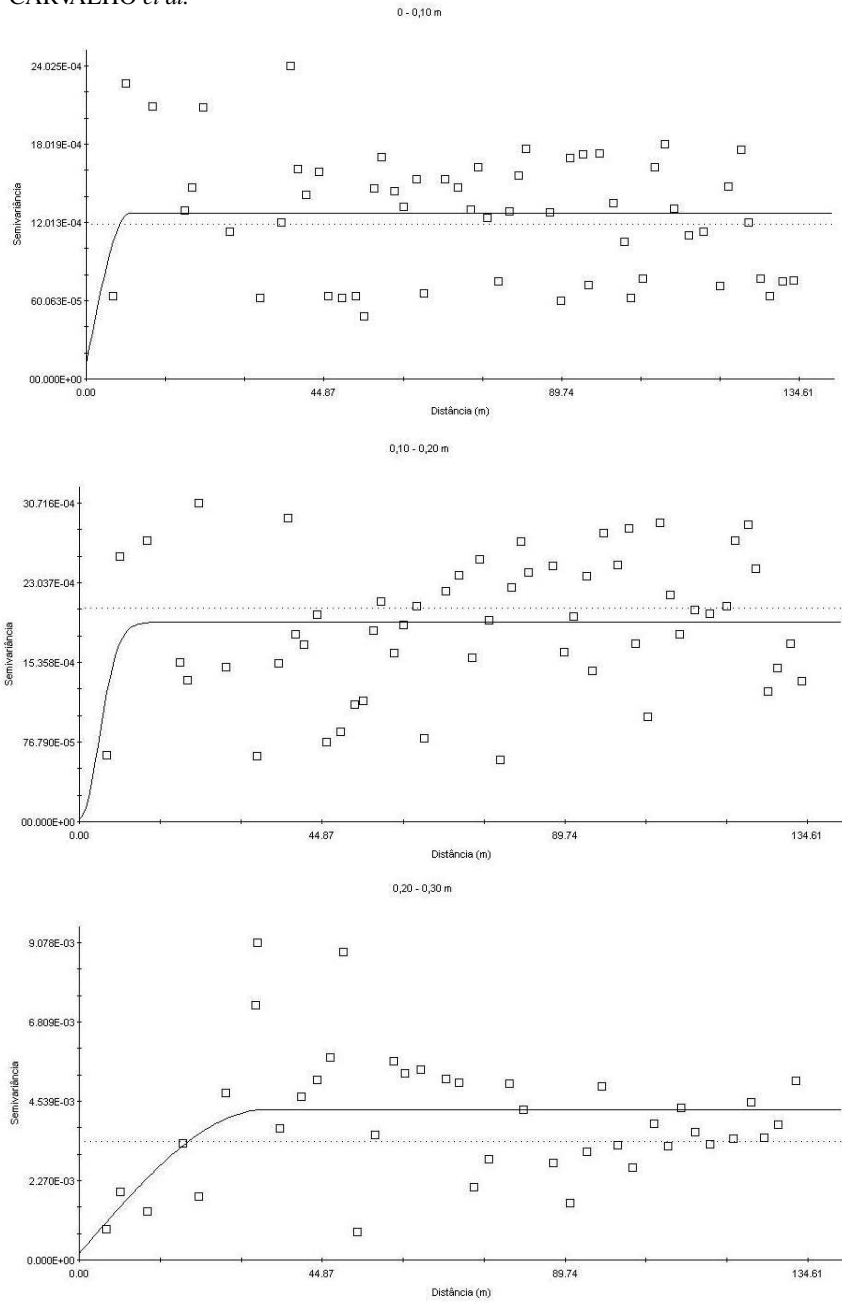

Figura 3. Semivariogramas experimentais e modelados para a variável conteúdo de água a base de volume (m^3 m^{-3}) da camada de 0 – 0,10 m. Rio Brilhante-MS, 2008.

Concordando com esses resultados Souza *et al*. (2004) observaram em seu estudo que as variáveis analisadas apresentaram dependência espacial, expressa pelos modelos de semivariogramas (VIEIRA, 2000). Todas as variáveis ajustaram-se ao modelo esférico, com exceção da camada de 0 – 0,10 m para RMP e na camada de 0,10 a 0,20 m para conteúdo de água a base de volume, as quais se ajustaram ao modelo gaussian, confirmando os resultados de várias pesquisas que indicam o modelo esférico como o de maior ocorrência para os atributos do solo (TRANGMAR *et al*., 1985; SALVIANO, 1996; SOUZA *et al*., 1997).

De acordo com Trangmar *et al.* (1985), um efeito pepita de 0%, como no caso presente, indica que o erro experimental é praticamente nulo e que não existe variação significante a distâncias menores que a amostrada. Quanto menor a proporção do efeito pepita para o patamar, maior será a semelhança entre os valores vizinhos e a continuidade do fenômeno e menor a variância da estimativa e, portanto, maior a confiança que se pode ter nas estimativas (VIEIRA, 1997). Para a variável RMP observou-se efeito pepita relativamente alto variando de 4,03 a 8,08, indicando que o erro experimental existe. Como a RMP é realizada num raio pequeno, erros como estes são previstos e não comprometem o trabalho, em função do número de repetições alto da área amostrada.

Conclusões

Para as três camadas estudadas existe estrutura de dependência espacial das variáveis estudadas. Para a variável RMP os alcances foram de 23,03, 36,80 e 12,10 m, nas camadas 0 – 0,10 m, 0,10 – 0,20 m e 0,20 – 0,30 m, respectivamente. Para a variável conteúdo de água no solo os alcances foram de 8,20, 8,66 e 8,00 m, nas camadas 0 – 0,10 m, 0,10 – 0,20 m e 0,20 – 0,30 m, respectivamente.Não houve correlação entre RMP e conteúdo de água no solo nas camadas estudadas.

Referências

ABREU, S.L. *et al.* Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do solo, da produtividade e da qualidade de grãos de trigo em Argissolo franco arenoso sob plantio direto. **Ciência Rural**, v.33, p.275-282, 2003.

ASSIS, R.L.; LANÇAS, K.P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo vermelho distroférrico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Revista Brasileira Ciência do Solo***,* 29:515-522, 2005

BAIO, F.H. **Aplicação localizada de defensivos baseada na variabilidade espacial das plantas daninhas**. 2001. 133f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - "Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

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.

BURGER, J.A.; KELTING, D.L. Using soil quality indicators to asses Forest stand management. **For Ecol. Manag**., 122:155-166, 1999.

BERTOL, I.; BEUTLER, J.F.; LEITE, D.; BATISTELA, O. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.58, n.3, p.555-560, jul./set. 2001.

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

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Avaliação da safra agrícola de cana-de-açúcar 2006/2007 – Segundo Levantamento – Julho/2008.** Disponível em: <www.conab.gov.br>. Acesso em: 4 jul. 2008.

COSTA NETO, P.L.O. **Estatística**. 10. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1990. 264p.

DELGADO, A.A. Os efeitos da queima dos canaviais. **STAB- Açúcar e Subprodutos**, v.3, n.6, p.42-45, 1985.

EGUCHI, E.S.; SILVA, E.L.; OLIVEIRA, M.S. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado e da taca de infiltração básica determinadas "in situ". **Ciência Agrotécnica**, Lavras, p.1607-1613, dez. 2003.

FAULIN, G.C. **Variabilidade espacial do teor de água e sua influência na condutividade elétrica do solo.** 2005. 53f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

GOLDEN SOFTWARE. **Surfer for Windows, version 6.01:** software de geração de mapas de contorno e superfícies contínuas (software). Colorado, 1995.

GREGO, R.G.; VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.169-177, 2005.

HANSEN, J.W. Is agricultural sustainability a useful concept? **Agricultural Systems**, v.50, p.117-143, 1996.

HILL, R.L.; HORTON, R.; CRUSE, M.R. Tillage effects on soil water retention and pore size distribution of two mollisols. **Soil Sci. Soc. Am. J.,** v.49, p.1264-1270, 1985.

IIJIMA, M.; KONO, Y. Interspecific differences of the root system structures of four cereal species as affected by soil compaction. **Japanese Journal of Crop Science**, v.60, p.130-138, 1991

LAWLES, J.F. **Statistical models and methods for lifetime data**. New York: Wiley, 1982. 580p.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop prodution. **Adv.Soil.,** 1:277-294, 1985.

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.

LIMA, C.L.R.; PAULETTO, E.A.; GOMES, A.da S.; HARTWIG, M.P.; LIMA, A.C.R.; MULLER, V. Resistência mecânica de um Planossolo cultivado com arroz irrigado sob diferentes sistemas de manejo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 1., Pelotas. **Anais...** Pelotas, 1999.

MERCANTE, E. *et al.* Variabilidade especial e temporal da resistência mecânica do solo à penetração em áreas com e sem manejo químico localizado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.6, p.1149-1159, 2003.

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.

OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; RESCK, D.V.S.; CURI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um latossolo vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p.327-336, 2004.

ORTIZ, J.L **Emprego do geoprocessamento no estudo da relação entre potencial produtivo de um povoamento de eucalipto e atributos do solo e do relevo**. 2003. 205p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - "Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

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.

SEGANFREDO, M.L.; ELTS, F.L.F.; BRUM, A.C.R. Perdas de solo e água e nutrientes por erosão em sistemas de culturas em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, p.287-291, 1997.

SENE, M. *et al.* Relationships of soil texture and structure to corn yield response to subsoiling. **Soil Sci Am J**, Madison, v.49, p.422-427, 1985.

SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, Cambridge, v.52, p.591-611, 1965

SILVA JUNIOR, R.L. **Variabilidade espacial do índice de cone correlacionada com mapas de produtividade**. 2001. 132f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

SILVA, V.R. *et al.* Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ciência Rural**, v.34, n.2, p.399-406, 2004.

SOUZA, L.S.; COGO, N.P.; VIEIRA, S.R. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em um pomar cítrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, p.367-372, 1997.

SOUZA, Z.M. *et al*. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho distrófico sob semeadura direta em Selvíria (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.699-707, 2001.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.6, p.937-944, nov./dez. 2004.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas,** v.15, n.2, p.229-35, 1991.

TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; WADE, M.K.; UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy,** San Diego, v.38, n.1, p.45-94, 1985.

UTSET, A.; CID, G. Soil penetrometer resistance spatial variability in a ferralsol at several soil moisture conditions. **Soil e Tillage Research**, Amsterdam, v.61, n.3-4, p.193-202, 2001.

VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um latossolo roxo de Campinas (SP). **Bragantia**, Campinas, v.56, n.1, p.181-190, 1997.

_____. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V.; V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.1-53.

WATANABE, S.H.; TORMENA, C.A.; ARAUJO, M.A.; VIDIGAL FILHO, P.S.; PINTRO, J.C.; COSTA, A.C.S.; MUNIZ, A.S. Propriedades físicas de um latossolo vermelho distrofico infuenciadas por sitema de preparo de solo utilizados para implantação da cultura da mandioca. **Acta Sci.,** v.24, p.1255-1264, 2002.

WEBSTER, R. Quantitative spatial analysis of soil in field. **Advance soil Science**, New York, v.3, p.1-79, 1985.

WEBSTER, R.; OLIVER, M.A. **Estatistical methods in soil and land resource survey**. Oxford: Oxford University Press, 1990. 316p.

Agradecimentos

A Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul (FUNDECT), pelos recursos financeiros destinados a execução do projeto.

A Usina ETH Bioenergia por ter disponibilizado equipe técnica e infra-estrutura necessária para o desenvolvimento deste projeto.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Cientifico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de iniciação científica durante a realização do projeto.