

VARIABILIDADE ESPACIAL DO ÍNDICE DE CONE, CORRELACIONADA COM TEXTURA E PRODUTIVIDADE

MOLIN, J.P.¹; SILVA JÚNIOR, R. L. da²

RESUMO: Este trabalho teve, como objetivo, explorar a variabilidade espacial do índice de cone, utilizando um penetrômetro de cone hidráulico-eletrônico, posicionado por GPS com sinal diferencial (DGPS), com análise geoestatística dos dados e seu processamento com um programa de Sistema de Informação Geográfica (SIG), em uma lavoura, conduzida sob semeadura direta por longo período. Essa variabilidade foi correlacionada com aquela expressa pela textura do solo e pela produtividade, para avaliar as possíveis conseqüências da compactação, causada pelo tráfego de máquinas na produtividade das culturas. Foi utilizada uma área sob semeadura direta, a partir de 1985, no município de Castro, PR. Mapas do índice de cone das profundidades 0,10 a 0,40 m foram gerados e correlacionados com mapas de textura do solo, obtidos por amostragem em grade regular, e de produtividade da cultura de soja que antecedeu e de milho que sucedeu a mensuração, obtidos com monitor comercial equipando uma colhedora. Os mapas dos componentes da textura e do índice de cone do solo mostraram a variabilidade existente entre as regiões representadas pelos diversos pontos amostrais levantados e apresentaram estrutura de dependência espacial. O teor de areia na camada de 0 a 0,10 m de profundidade apresentou correlação de -0,47 com o índice de cone a 0,10 m. Pela análise de correlação, observou-se redução da produtividade do milho e da soja com o aumento do índice de cone, em todas as profundidades, porém com maiores valores de coeficientes de correlação, na ordem de -0,35 a -0,47, para o milho, e de -0,28 a -0,31, para a soja, nas profundidades de 0,10 a 0,20 m, onde o efeito do tráfego de máquinas é maior.

Palavras-chave: compactação do solo, variabilidade espacial, agricultura de precisão.

SPACIAL VARIABILITY OF CONE INDEX CORRELATED WITH SOIL TEXTURE AND YIELD

ABSTRACT: The objective of this work was to explore the spatial variability of cone index using a hydraulic-electronic cone penetrometer linked to a Differential Global Positioning System (DGPS), with a geostatistical analysis of data and treatment with a GIS (Geographic Information System) in a long-term no-till field. This spatial variability was correlated with that from soil texture and yield for analyzing the possible effects of traffic compaction on crop yields. The work was carried out in a field at no-till since 1985, located in Castro, PR. Cone index maps of the depths from 0.10 to 0.40 m were developed and correlated with soil texture obtained from grid sampling and yield maps of soybean from before and corn following the field cone index measurements, obtained from a yield monitor. Soil texture and cone index maps showed its spatial variability within the field and spatial structure. The correlation analysis between yield and cone index showed a tendency of yield loss on corn and soybeans as the cone index increased in all depths, with larger correlation coefficient values, of -0.35 to -0.47 for corn and of -0.28 to -0.31 for soybean at depths of 0.10 to 0.20 m, where the machinery traffic effect was more intense.

Key words: soil compaction, spatial variability, precision agriculture.

¹ Professor do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP. Piracicaba (SP). E-mail: jpmolin@esalq.usp.br. Pesquisador do CNPq.

² Professor do Departamento de Engenharia Agrícola e Solos da Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Amazonas. Manaus (AM). E-mail: rlsilva@fua.br.

Recebido pela Comissão Editorial em: 17.11.03

Aprovado pela Comissão Editorial em: 20.02.04

INTRODUÇÃO

A compactação do solo é um processo não-natural em que a porosidade e a permeabilidade são reduzidas, a resistência é aumentada e muitas mudanças são provocadas na estrutura do solo e em várias características de seu comportamento (Soane & Ouwerkerk, 1994).

A resistência à penetração de um volume de solo não-perturbado, ou de um material de solo completamente homogeneizado, com um determinado potencial mátrico da água, é quantificada pelo valor da pressão de pré-consolidação, que pode ser definida como o valor da pressão no ponto de transição entre a curva de compressão secundária e a reta de compressão virgem (Kézdi, 1974; Bradford & Gupta, 1986; Horn & Lebert, 1994). A curva de compressão secundária representa os níveis de pressões experimentadas pelo solo no passado, com deformações pequenas, elásticas e recuperáveis, enquanto a reta de compressão virgem representa as primeiras pressões aplicadas ao solo, com deformações plásticas e irreversíveis. A pressão de pré-consolidação representa a maior pressão que o solo já suportou no passado e reflete o tipo de manejo utilizado. Portanto, para que não ocorra compactação adicional, o solo deve ser cultivado ou trafegado na região da curva de compressão secundária (Dias Júnior & Pierce, 1996).

A medida da resistência do solo à penetração serve para identificar o estado de compactação do solo. Os penetrômetros de cone são instrumentos de medida que caracterizam a resistência do solo à penetração por um método uniforme padrão. A pressão necessária para cravar um cone circular de 30 graus até uma determinada profundidade no solo, expressa em megaPascal (MPa), é um índice da resistência do solo chamado de índice de cone (ASAE, 1999). Mapas do índice de cone têm sido uma ferramenta valiosa para a visualização das configurações da resistência do solo à penetração,

especialmente em relação ao preparo e ao tráfego efetuados pelas máquinas (Clark et al. 1993; Clark, 1994).

Valores da resistência à penetração podem ser utilizados para caracterizar os solos em termos de habilidade de crescimento das culturas, de resistência à penetração das raízes e de emergência das sementes (Taylor & Gardner, 1963). Miller (1987) afirma que a penetração das raízes pode ser reduzida, se a resistência do solo atingir valores da ordem de 3,0 MPa, o que pode resultar em decréscimo no suprimento de água e de nutrientes para as plantas.

Estudos relacionados à mineração motivaram o desenvolvimento de ferramentas estatísticas capazes de traduzir a estrutura de variabilidade espacial de um determinado atributo, além de fazer interpolações que levam a boas estimativas de pontos não amostrados. Dessa forma, mapas podem ser construídos para exibir a distribuição do atributo na região estudada, para fazer estimativas, para ter parâmetros a fim de verificar viabilidade e para orientar estratégias (Ribeiro Júnior, 1995).

Este trabalho tem, como objetivo, explorar a variabilidade espacial do índice de cone, por meio de análises geoestatísticas. Propõe a geração de mapas da resistência do solo à penetração, expressos pelo índice de cone, a partir de amostras georeferenciadas, correlacionando-os com mapas de produtividade de uma lavoura, conduzida sob semeadura direta por longo período, para avaliar as possíveis consequências da compactação, causada pelo tráfego de máquinas, na produtividade das culturas.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em uma área agrícola pertencente à Fundação ABC, em Castro, PR, nas coordenadas geográficas 24° 51' de latitude sul e 49° 55' de longitude oeste, com cerca de 23 ha e altitude média

de 1030 metros acima do nível do mar. O clima predominante, segundo a classificação de Köppen (1948), é do tipo Cfb. O solo foi classificado como um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico. A área vem sendo cultivada com milho e soja no verão e com aveia e trigo no inverno, em sistema de semeadura direta, desde 1985.

Os dados de índice de cone foram coletados em abril de 2000, após a colheita da lavoura de milho. Para a coleta dos dados, foi utilizada a amostragem sistemática em forma de grade, gerada pelo programa de SIG SSToolbox (SST Development Group, Inc.®), dedicado à agricultura de precisão. Foi gerada uma malha amostral, com espaçamento regular e 25 m de lado, o que equivale a 16 leituras por hectare, perfazendo 358 pontos no total. As sondagens foram realizadas com um penetrômetro de cone, de padronização ASAE (ASAE, 1999), com haste de 0,0095 m de diâmetro e cone de 0,00013 m² de área de base, construídos em aço inoxidável, montado em uma estrutura metálica robusta, acoplado ao engate de três pontos de um trator (Silva Júnior et al., 2000). A potência hidráulica é fornecida pelo trator, que, pelo comando da alavanca do controle remoto controla os movimentos de inserção e de retirada da haste do solo, pela expansão e pelo retorno de um cilindro hidráulico. Regulou-se a penetração da haste para uma velocidade constante de 0,030 m.s⁻¹, por meio de válvulas controladoras do fluxo de óleo e da rotação do motor do trator. O penetrômetro foi equipado com um sistema de aquisição de dados eletrônico, composto por um coletor de dados Campbell, modelo CR10X, uma célula de carga Gefran, modelo TG61-501, com capacidade para 4903 N e um sonar Polaroid, modelo 6500. Os dados do índice de cone foram coletados de forma contínua, para cada ponto e foram selecionados os dados das profundidades de 0,10, 0,15, 0,20, 0,25, 0,30, 0,35 e 0,40 m. Para o processamento e a análise dos dados, foi utilizada uma planilha eletrônica.

Todos os pontos da malha amostral foram georeferenciados, utilizando-se um receptor de GPS (Sistema de Posicionamento Global) OmniSTAR 3000L (Fugro®), com correção diferencial feita em tempo real, via satélite geoestacionário, com serviço fornecido pelo próprio fabricante do GPS.

Para monitorar os teores de água do solo, na área experimental, foi coletada uma amostra composta de 13 sub-amostras de pontos aleatórios de toda a área, nas profundidades de 0,10 e 0,30 m, utilizando-se um trado holandês, no mesmo dia da coleta dos dados de índice de cone. Para a sua determinação, utilizou-se o método da secagem em estufa e da pesagem.

Uma amostragem de solo em grade regular de 60 m de lado, equivalente a 2,8 amostras por hectare, totalizando 57 pontos com amostragem composta de 8 sub-amostras em torno de cada ponto, à profundidade de 0 a 0,1 m, foi realizada em outubro de 2001 e, desta, foram obtidos os dados de textura. O procedimento adotado para a obtenção da grade amostral foi o mesmo adotado para aquela referente ao índice de cone. As análises de textura do solo foram obtidas em laboratório, pelo método de dispersão total.

Para identificar a estrutura de dependência espacial dos dados de índice de cone, utilizou-se a função semivariância (Almeida & Ribeiro Júnior, 1996). A partir dos valores de semivariância, construíram-se os semivariogramas experimentais para o conjunto de dados do índice de cone de cada profundidade e de cada textura. Os semivariogramas foram gerados pelo programa GS+ (Geostatistics for the Environmental Sciences®). O grau de dependência espacial foi classificado de acordo com os critérios propostos por Cambardella et al. (1994). Segundo estes autores, semivariogramas que apresentam efeito pepita menor ou igual a 25% do patamar têm forte dependência espacial. A dependência é moderada, quando essa relação variar de 25 a 75% e

fraca, quando o efeito pepita for superior a 75% do patamar. Os parâmetros dos modelos teóricos foram utilizados na interpolação de valores em pontos não amostrados pela técnica da krigagem ordinária, estimada para células medindo 10 m de lado. Pelas aplicações sucessivas da krigagem ordinária, construíram-se os mapas do índice de cone de cada profundidade, bem como dos componentes da textura nas camadas analisadas.

O monitoramento da produtividade das culturas foi feito por uma colhedora John Deere®, Modelo 9510, equipada com receptor de GPS, com correção diferencial em tempo real, via satélite OmniSTAR, e sistema de monitoramento de produtividade "GreenStar" (John Deere®). Os mapas foram gerados a partir dos dados brutos, obtidos pelo sistema de monitoramento da produtividade, com o auxílio do programa SSToolbox. Para a geração dos mapas de produtividade, utilizou-se o interpolador inverso da distância ao quadrado, em função da elevada densidade de pontos, que variou de aproximadamente 700 por hectare para a soja a 1700 pontos por hectare para o milho (Moore, 1998). Isso ocorreu após terem sido submetidos a um processo de filtragem, de acordo com critérios que permitissem a eliminação de pontos com valores improváveis, bem como pontos com problemas de localização, conforme Gimenez & Molin (2003).

Foram efetuadas análises de correlação de Pearson entre o índice de cone de todas as profundidades, os componentes da textura e a produtividade nas duas safras, realizada com o programa STATISTICA® (Statsoft Inc). Gerou-se uma matriz de correlação, envolvendo todos os fatores, que permitiu a análise da relação entre os mesmos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores observados para os teores de água foram 0,264 e 0,270 g.g⁻¹ para as profundidades de 0,10 e 0,30 m, respectivamente. Considerou-se haver boa estabilidade do teor de água no perfil, não se esperando, portanto, interferência diferenciada nos valores de índice de cone, embora não tenha sido efetuado um monitoramento da variabilidade espacial.

Os parâmetros dos modelos dos semivariogramas ajustados para os valores do índice de cone e da textura e o componente estrutural (C1/C0+C1), segundo et al. (1994), são apresentados na Tabela 1. O índice de cone da profundidade de 0,15 m apresentou patamar maior que 75% do efeito pepita, indicando forte dependência espacial do índice de cone. As demais profundidades apresentaram patamar abaixo desse limite, porém já entre 25 a 75% do efeito pepita, indicando moderada dependência espacial do índice de cone. Já, os componentes da textura, argila e areia, apresentaram forte dependência espacial.

Para o índice de cone, o efeito pepita e o patamar apresentaram diminuição e posterior crescimento, com o aumento da profundidade, indicando que as propriedades do solo que afetam o índice de cone se tornam progressivamente mais uniformes até as profundidades entre 0,15 e 0,30 m, crescendo a partir de então. No entanto, como a área tem sido conduzida em sistema de semeadura direta ininterrupta, desde 1985, pode-se afirmar que as camadas mais profundas, abaixo de 0,25 m, têm sofrido pouca interferência do sistema de cultivo e do tráfego de máquinas, o que não é provável nas camadas mais superficiais.

Tabela 1 - Parâmetros e modelos dos semivariogramas ajustados e o componente estrutural (patamar como porcentagem do efeito pepita) para os valores de índice de cone das diferentes profundidades e dos componentes da textura do solo da área experimental.

Fator	Profundidade (m)	¹ C0	² (C0 + C1)	³ A (m)	⁴ [C1/C0 + C1].100	Modelo
IC (MPa)	0,10	0,32	1,17	1254	72,6	Esférico
	0,15	0,21	1,03	1428	79,6	Esférico
	0,20	0,24	0,81	1227	70,4	Esférico
	0,25	0,28	0,75	1046	62,7	Esférico
	0,30	0,27	0,68	759	60,3	Esférico
	0,35	0,28	0,86	882	67,4	Exponencial
	0,40	0,77	2,80	54	72,5	Exponencial
Argila (%)	0 – 0,10	10,59	52,83	175,5	80,0	Esférico
Areia (%)	0 – 0,10	1,94	43,05	473,1	95,5	Linear com patamar

¹ efeito pepita; ² patamar; ³ alcance; ⁴ componente estrutural (Cambardella et al. (1994).

As dependências espaciais observadas para os valores do índice de cone mostram que as análises estatísticas clássicas, em que as observações são consideradas aleatórias e independentes espacialmente e que tratam o solo como um meio homogêneo, devem ser substituídas por análises espaciais, que levam em consideração as relações entre observações vizinhas e que tratam o solo como um meio heterogêneo. De forma semelhante à observada por Lanças et al. (2000), com

esse procedimento, é reduzido o risco de superdimensionar-se a operação de intervenção em alguns setores e subdimensionar-se em outros.

Os mapas de produtividade da cultura da soja, safra 1999, e do milho, safra 2000, da área experimental, estão representados na Figura 1. Na Figura 2, são apresentados os mapas dos componentes da textura do solo e, na Figura 3, são apresentados os mapas do índice de cone de todas as profundidades.

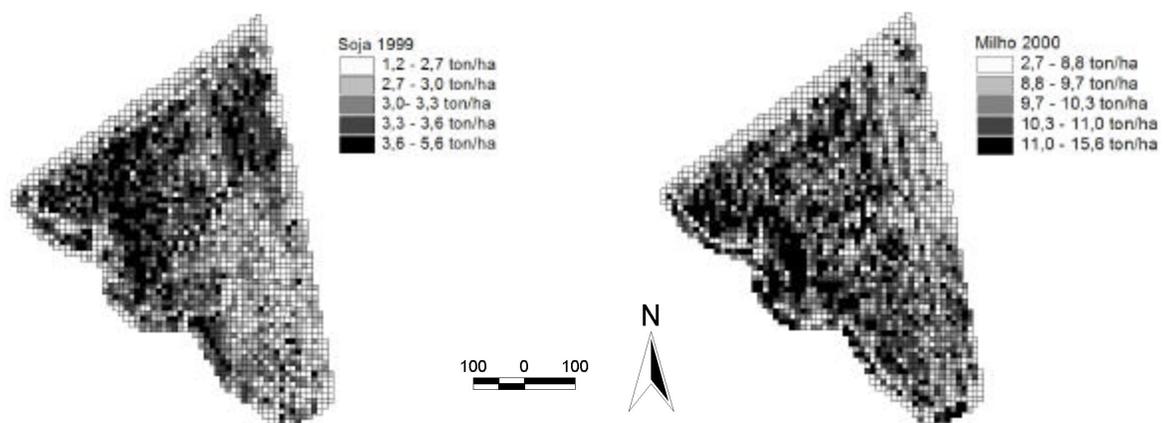


Figura 1 - Mapas de produtividade da soja, safra 1999, e do milho, safra 2000.

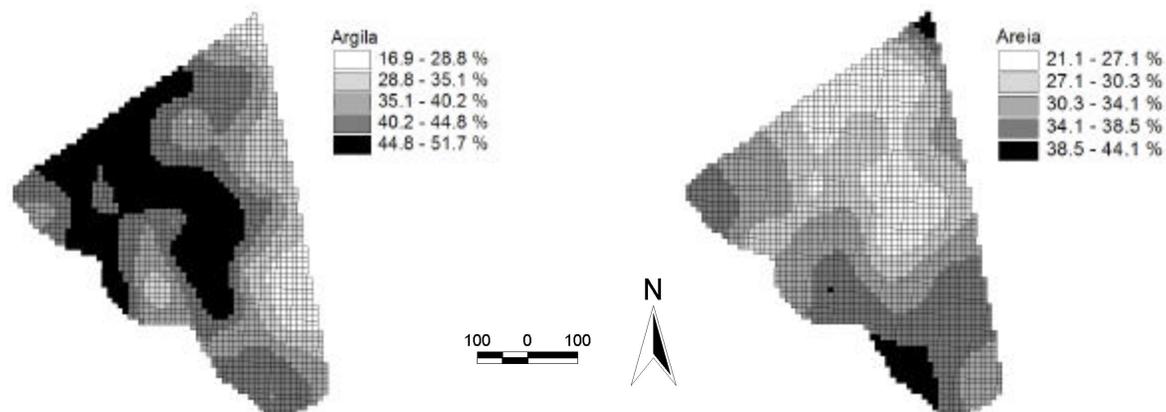


Figura 2 - Mapas dos teores de argila e de areia na profundidade de 0 a 0,10 m.

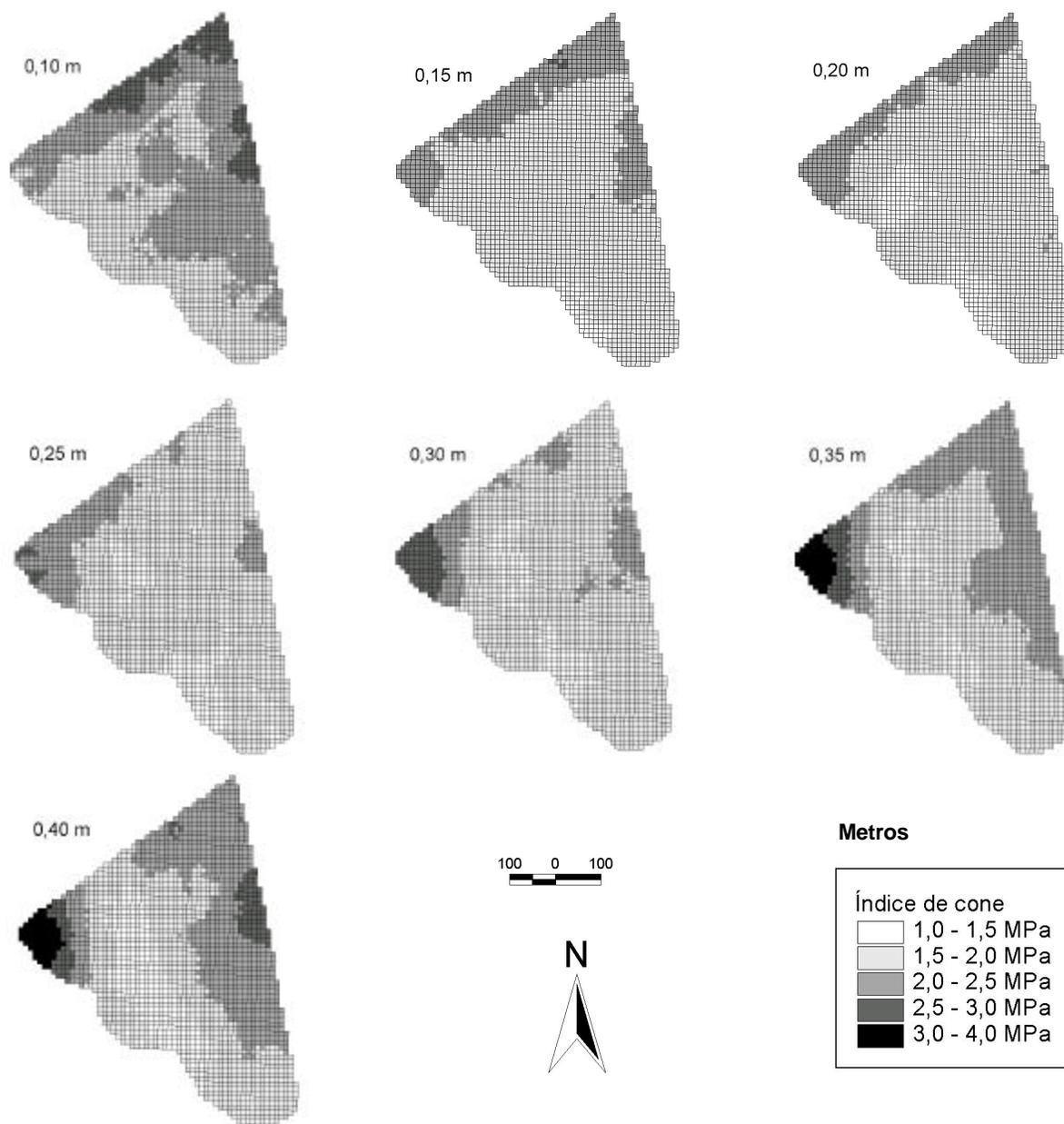


Figura 3 - Mapas do índice de cone das profundidades de 0,10, 0,15, 0,20, 0,25, 0,30, 0,35 e 0,40 m.

Os resultados da análise de correlação entre os valores de índice de cone para cada profundidade, os componentes da textura do solo e a produtividade da cultura que antecedeu e da que sucedeu a sua mensuração estão representados na Tabela 2.

Em todas as profundidades, observa-se que predominou o índice de cone entre 1,5 a 2,5 Mpa. Com base nos coeficientes de correlação, há uma indicação de que a produtividade se correlaciona com o índice de cone do solo, com maior intensidade para as menores profundidades. A análise de correlação linear de Pearson (Steel & Torrie, 1980) tem aplicabilidade na avaliação de tendências entre duas variáveis. No entanto, para os casos de análise de dados georeferenciados, como no presente estudo, a dispersão é geralmente acentuada e os valores dos coeficientes de correlação são baixos. Em estudos de campo, sem controle de variáveis, o que se espera dessa análise são indicadores de tendências.

Para as produtividades das duas safras com culturas distintas, por exemplo, observa-se correlação positiva de 0,38. O crescimento de uma variável, a partir

do crescimento da outra, depende de inúmeros fatores, mas, quanto maior a similaridade na distribuição espacial da produtividade entre os ciclos, melhor será para a definição de unidades de gerenciamento, com base na produtividade histórica (Molin, 2002). No entanto, como a correlação entre a produtividade das duas culturas é baixa, novamente não é esperada alta correlação entre as produtividades e o índice de cone, que se presume estável no tempo, caso não haja intervenção.

Ao analisarem-se as correlações do índice de cone entre as profundidades, observa-se alta vinculação para camadas adjacentes. Seus valores variam de 0,86 entre 0,15 e 0,20 m, a 0,97, entre 0,30 e 0,35 m de profundidade. Consistentemente, os menores valores de correlação se encontram entre as camadas mais superficiais, confirmando os resultados da análise geoestatística, que demonstra maior uniformidade do índice de cone nas maiores profundidades. No entanto, ao analisar-se a correlação entre os valores de índice de cone de camadas afastadas, como entre 0,10 m e 0,25 m ou 0,30 m, a correlação é de apenas 0,40, o que

Tabela 2 - Valores dos coeficientes de correlação entre os índices de cone para cada profundidade, os componentes da textura do solo e a produtividade das culturas de soja, 1999, e de milho, 2000.

Variável	Textura		Produtividade		Profundidade do índice de cone (m)						
	Argila	Areia	Milho	Soja	0,40	0,35	0,30	0,25	0,20	0,15	0,10
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
11	-0,17	-0,47	-0,47	-0,28	0,48	0,40	0,40	0,50	0,66	0,88	1,00
10	-0,15	-0,43	-0,41	-0,26	0,69	0,64	0,65	0,72	0,86	1,00	
9	-0,12	-0,16	-0,35	-0,31	0,75	0,78	0,82	0,87	1,00		
8	0,07	-0,16	-0,25	-0,18	0,77	0,88	0,95	1,00			
7	-0,01*	-0,13	-0,21	-0,19	0,89	0,97	1,00				
6	-0,17	-0,10	-0,21	-0,21	0,96	1,00					
5	-0,28	-0,18	-0,25	-0,24	1,00						
4	0,19	-0,05	0,38	1,00							
3	0,12	0,12	1,00								
2	-0,42	1,00									

* Não significativo a 5% de probabilidade

demonstra continuidade e transição gradual do índice de cone no perfil, com causas possivelmente associadas a fatores de solo, para as camadas mais profundas, e ao tráfego de máquinas, nas camadas mais superficiais.

A análise de textura, a rigor, apenas representa a camada de 0 a 0,1 m de profundidade e a sua correlação com o índice de cone, nessa profundidade foi de -0,47, para o teor de areia, indicando que a textura do solo, na área experimental, tem relação com o comportamento espacial da compactação medida pelo índice de cone. Com o decréscimo no teor de areia do solo, houve acréscimo no índice de cone observado.

Para a cultura do milho, em todas as profundidades analisadas, verifica-se decréscimo da produtividade, com o aumento do índice de cone. O fato manifesta-se com maior intensidade nas profundidades de 0,10, 0,15 e 0,20 m, que apresentam coeficientes de correlação de -0,47, -0,41 e -0,35, respectivamente. Abaixo dessa profundidade o coeficiente de correlação estabiliza-se entre -0,21 e -0,25.

Para a cultura da soja, também foi observado decréscimo na produtividade, com elevação do índice de cone, em todas as profundidades. No entanto, há menor consistência do que no caso da cultura do milho, com coeficientes de correlação menores e com valor máximo de 0,31 a 0,20 m de profundidade. Certamente as duas culturas, com sistemas radiculares e demais características fisiológicas distintas, reagem de forma diferenciada à presença de compactação do solo. É importante salientar que existem vários outros fatores não monitorados, associados ao clima e ao solo e que podem ter contribuído para essa diferença, o que demonstra a grande dificuldade em modelar-se a resposta de culturas a fatores de produção.

A dispersão dos valores de produtividades e dos respectivos índices de cone para as profundidades de

0,10 m e de 0,30 m, como exemplo, são mostradas na Figura 4, assim como a linha ajustada para a distribuição.

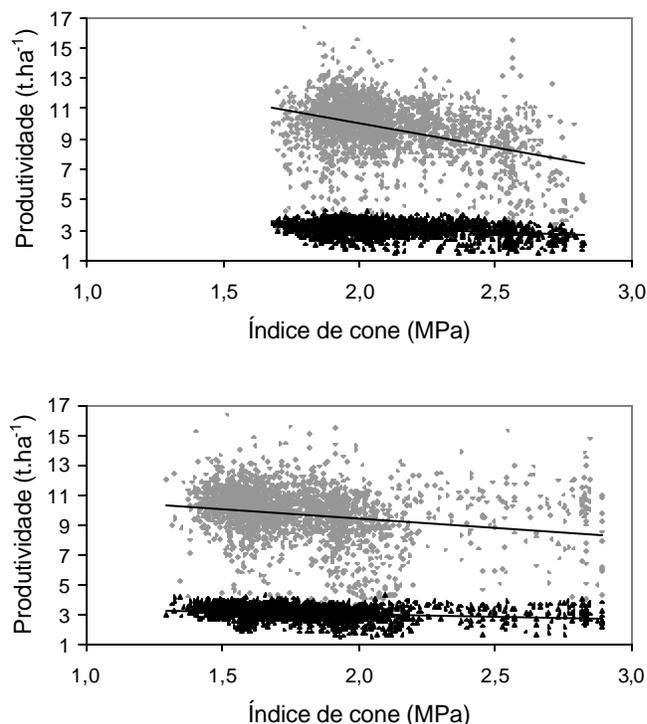


Figura 4 - Relação entre produtividade do milho e da soja e índice de cone, para as profundidades de 0,10 e de 0,30 m.

Assim como os mapas, os resultados da análise de correlação, tanto para a cultura do milho como para a da soja indicam o provável efeito do tráfego de máquinas em área sob semeadura direta, que provoca compactação superficial, o que pode causar prejuízos às culturas. Tais resultados são semelhantes aos encontrados por Kayombo et al. (1986), que estudaram o efeito da compactação dos rodados sobre o desenvolvimento dessas culturas, em sistema de semeadura direta em um solo tropical, no oeste da Nigéria.

Os fatos observados sugerem que a compactação, acima de tudo, não é uniformemente distribuída na área. Algumas regiões da lavoura apresentaram índices de

cone com valores mais elevados, especialmente para as profundidades de 0,10 e 0,15 m. Nessas profundidades, observa-se a associação entre as áreas com maiores produtividades, especialmente para o milho, e as áreas com menores valores de índice de cone, o que indica possível efeito negativo da compactação, medida pelo índice de cone, e a produtividade. Isso induz à busca de soluções de intervenção, que podem ter sua área de ação facilmente definida pela análise dos mapas de índice de cone.

CONCLUSÃO

Os mapas do índice de cone do solo, gerados por meio de penetrômetro de cone hidráulico-eletrônico, GPS, SIG e programas computacionais geoestatísticos, mostraram as diferenças existentes entre as regiões representadas pelos diversos pontos amostrais levantados, permitindo a identificação de sub-áreas onde o gerenciamento das práticas de campo pode ser orientado em conformidade com o grau da variabilidade desse fator.

Com o decréscimo no teor de areia do solo houve acréscimo no índice de cone observado, sendo, na camada de 0 a 0,10 m de profundidade, a correlação observada de -0,47, com o índice de cone a 0,10 m.

A textura do solo e os valores de índice de cone para todas as profundidades analisadas, apresentaram estrutura de dependência espacial. As produtividades do milho, com mais intensidade, e da soja, com menos intensidade, indicaram decréscimo com o aumento do índice de cone, especialmente para as menores profundidades, entre 0,10 e 0,20 m.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, C.F.P. de; RIBEIRO JÚNIOR, P.J. **Estimativa da distribuição espacial de retenção de água em um solo utilizando krigagem indicatriz**. Curitiba: UFPR, Departamento de Estatística, 1996. 37p. (Relatório Técnico do Laboratório de Estatística).
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Soil cone penetrometer (ASAE S313.3). St. Joseph: ASAE, 1999. p.834.
- BRADFORD, J. M.; GUPTA, S. Soil compressibility. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. pt.I: Agronomy, p. 479-492.
- BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **The nature and properties of soils**. Portland: Book News, In., 1998. 881p.
- 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, p.1501-11, 1994.
- CLARK, R.L. **Effect of controlled traffic on soil cone index**. St. Joseph, 1994. 11p. (ASAE Paper, 94-1039).
- CLARK, R.L.; RADCLIFFE, D. E.; LANGDALE, G. W.; BRUCE, R. R. Soil strength and water infiltration as affected by paratillage frequency. **Transactions of the ASAE**, v.36, n.5, p.1301-1305, 1993.
- DIAS JÚNIOR, M.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, p.175-82, 1996.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

- GIMENEZ, L.M.; MOLIN, J.P. Algoritmo para redução de erros em mapas de produtividade para agricultura de precisão. **Revista Brasileira de Agrocomputação**, 2003. /No prelo/.
- HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B. D.; VAN OUWERKERK, C. (Ed.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. 660p.
- KAYOMBO, B.; LAL, R.; MREMA, G. C. Traffic-induced compaction in maize, cowpea and soybean production on a tropical Alfisol after ploughing and no-tillage: Soil physical properties. **Journal of Science in Food and Agriculture**, v.37, p.969-78, 1986.
- KÉZDI, A. **Soil physics**. Trad. I. Lazányi. Amsterdam: Elsevier, 1974. 294p. (Handbook of soil mechanics, 1).
- KÖPPEN, W. P. **Climatología, con un estudio de los climas de la tierra**. México: Fondo de Cultura Económica, 1948. 478p.
- LANÇAS, K.P.; CASTRO NETO, P.; NAGAOKA, A.K.; GUERRA, S.P.S. Índice de cone e mapas de isocompactação do solo agrícola obtidos com a utilização de um penetrômetro hidráulico-eletrônico e um sistema de posicionamento global diferencial (DGPS). In: BALASTREIRE, L.A. (Ed.). **O estado-da-arte da agricultura de precisão no Brasil**. Piracicaba: ESALQ, 2000. 224p.
- MILLER, D.E. Effect of subsoiling and irrigation regime on dry bean production in the Pacific Northwest. **Soil Science Society of America Journal**, v.51, p.784-787, 1987.
- MOLIN, J.P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Engenharia Agrícola**, v.22, n.1, p.83-92, 2002.
- MOORE, M. An investigation into the accuracy of yield maps and their subsequent use in crop management. Warwick, 1998. 379p. Thesis (Doctorate) - Silsoe College, Cranfield University.
- RIBEIRO JÚNIOR, P. J. Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo. Piracicaba, 1995, 99p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- SILVA JÚNIOR, R. L. da; AMARAL, J. R.; MOLIN, J. P. Caracterização de um penetrômetro hidráulico montado em trator com instrumentação eletrônica para aquisição de dados (compact disc). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 29., Fortaleza, 2000. Fortaleza: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2000.
- SOANE, B. D.; OUWERKERK, V. C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. 660p.
- STEEL, R.G.D.; TORRIE, J.H. **Principles and Procedures of Statistics**. New York: McGraw-Hill, 1980. 633p.
- TAYLOR, H.M.; GARDNER, H.R. Penetration of cotton seedling tap roots as influenced by bulk density, moisture content and strength of soil. **Soil Science**, v.96, n.3, p.153-156, 1963.