

Scientific Paper

Comparação espacial da resistência à penetração do solo entre dois pivôs centrais¹

Resumo

Marcio Nikkel²

Saulo de Oliveira Lima³

Em regiões com estações secas bem definidas, relevo plano e abundância em água, a irrigação por pivô central é uma opção para cultivar frutas, grãos e cereais. Com tecnificação e planejamento é possível realizar até três safras anuais. Contudo, a intensa utilização e mecanização do solo, podem provocar danos ao mesmo, provocando compactação do solo e prejudicando o crescimento das culturas. Resistência à penetração (RP) é um atributo que mede a compactação do solo, já a geoestatística é parte da estatística que quantifica as variáveis regionalizadas. O objetivo deste trabalho foi comparar a variabilidade espacial da resistência à penetração em dois pivôs centrais. Os dados foram coletados em março e outubro de 2014 após a colheita de soja e feijão, respectivamente. Uma malha amostral foi elaborada e georeferenciada em ambos os pivôs. Em cada ponto amostral foi feita a avaliação da RP com um penetrômetro de impacto. Pôde ser observado que a RP foi crescente, da camada mais superficial à mais profunda, em ambos os pivôs. A heterogeneidade de solo com a presença de plintita endurecida mascarou a leitura da RP, o que pôde ser percebido pelos valores máximos da estatística descritiva.

Palavras-chave: geoestatística; textura; física do solo.

Abstract

Spatial comparison of soil penetration resistance between two central pivots

In regions with well defined dry seasons, flat land and plenty of water, the center pivot irrigation is an option to cultivate fruits, crops and grain. With technological improvement and planning, the season can be performed up to three harvests per year. However, mechanization and intensive use of the soil can damage, causing soil compaction, hindering optimal crop growth. Penetration Resistance (PR) is a soil attribute that measures soil compaction and geostatistics is part of the statistic that quantifies the regionalized variables. The aim of this work was to compare the spatial variability of the penetration resistance on two center pivots. Data were collected in March and October 2014 after harvest of soybean and common bean, respectively. A georeferenced grid was established in both center pivots. On each mark the PR were evaluated with an impact penetrometer. The PR increased, from the soil surface layer to underlayer in both center pivots. The heterogeneity of soil, with the presence of plinthite in their irreversible form, ironstone, scrambles the reading data of PR as could be perceived by the maximum values of descriptive statistics data.

Keywords: geostatistics; texture; soil physics.

Resumen

Comparación espacial de la resistencia a la penetración del suelo entre dos pivotes centrales

Las regiones con estaciones secas bien definidas, relieve plano y abundancia en agua, la irrigación por pivote central es una opción para cultivar frutas, granos y cereales. Con tecnificación y planificación es posible realizar hasta tres cosechas anuales. Sin embargo, la intensa utilización y mecanización del suelo,

Received at: 21/10/2016

Accepted for publication at: 02/03/2017

¹ Parte da Dissertação de Mestrado apresentada pelo primeiro autor ao PPG-PV/UFT.

² Doutorando em Produção Vegetal. Universidade Federal do Tocantins - UFT - Avenida Paraguai - Setor Cimba - Araguaína-TO - 77824-8380. Email: markel.26@hotmail.com

³ Eng. Agrônomo. Dr. Prof. Universidade Federal do Tocantins - UFT - Avenida Paraguai - Setor Cimba - Araguaína-TO - 77824-8380. Email: saulolima@mail.uft.edu.br

pueden dañar al mismo, provocando compactación del suelo y perjudicando el crecimiento de los cultivos. La resistencia a la penetración (RP) es un atributo que mide la compactación del suelo, ya la geoestadística es parte de la estadística que cuantifica las variables regionalizadas. El objetivo de este trabajo fue comparar la variabilidad espacial de la resistencia a la penetración de dos pivotes centrales. Los datos fueron recolectados en marzo y octubre de 2014 después de la cosecha de soja y frijol, respectivamente. Una malla muestral fue elaborada y georeferenciada en ambos pivotes. En cada punto muestral se realizó la evaluación de la RP con un penetrómetro de impacto. Se pudo observar que la RP fue creciente, de la capa más superficial a la más profunda, en ambos pivotes. La heterogeneidad de suelo con la presencia de plintita endurecida enmascaró la lectura de la RP, lo que pudo ser percibido por los valores máximos de la estadística descriptiva.

Palabras clave: geoestadística; textura; física del suelo.

Introdução

A irrigação por pivô central é uma opção de irrigação para regiões com estações do ano bem definidas, abundância de água e solos com relevo plano, características encontradas no Tocantins. Segundo o último censo agropecuário realizado no Brasil, em torno de 4.540.000 ha são irrigados, destes, aproximadamente 19,6% são irrigados por sistemas de aspersão por pivô central (IBGE, 2012). Dependendo do manejo, planejamento e tecnificação, é possível realizar até três safras anuais em áreas irrigadas com este modelo (OLIVEIRA e ZOCOLER, 2013). Muitas vezes, o tamanho das áreas irrigadas por pivô central são extensas e, portanto, pode ocorrer a variação de classes de solo. A intensa utilização e mecanização do solo, seu manejo, pode provocar danos físicos ao mesmo, resultando em perdas de solo, água, nutrientes por erosão e a compactação do solo.

Um atributo de observação em campo da qualidade física do solo, quanto a compactação, é a resistência à penetração (RP) (MORAES et al., 2014), que geralmente é causada pelo tráfego de maquinário agrícola e mecanização do solo (RICHART et al., 2005). A compactação de solo pode ter efeito negativo para as plantas, visto que, dificulta o crescimento radicular (BLAINSKI et al., 2008).

HAMZA e ANDERSON (2005) comentam que quando o sistema radicular atinge a camada compactada, raízes secundárias começam a se proliferar na camada acima da compactada e reduzindo o crescimento para o subsolo, o que pode limitar a absorção de água e nutrientes e por consequência reduzir a produtividade das culturas. A RP é considerada um indicador físico de qualidade do solo e amplamente utilizada em pesquisas, tanto na agricultura, como pecuária e silvicultura (SANTANA et al., 2014;

FERREIRA et al., 2014 ; OLIVEIRA et al., 2016; CAMBI et al., 2017).

Fatores como tipo e manejo de solo, relevo, clima, entre outros, interferem em propriedades do solo, gerando variabilidade destes atributos em áreas agrícolas. Logo, geoestatística é parte da estatística aplicada que trata de problemas referentes às variáveis regionalizadas, com aleatoriedade de dados, com possível estruturação espacial, e assim, podendo estabelecer uma correlação espacial (YAMAMOTO e LANDIM, 2013).

O objetivo deste trabalho é comparar espacialmente, a resistência à penetração de dois pivôs centrais no sul do Tocantins.

Material e métodos

O trabalho foi conduzido na Fazenda Universo, município de Sucupira - TO, Brasil. Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é tropical semi-úmido AW (tropical de verão úmido e período de estiagem no inverno). A precipitação média anual é de 1500 mm. O experimento foi conduzido em duas áreas irrigadas por pivô central, um com 126 ha (pivô I) e outro com 80 ha (pivô II), os mesmos se localizam na latitude 11°54'10"S, longitude 48°54'20"O e latitude 11°54'00"S, longitude 48°53'59"O, respectivamente. A altitude de ambos é em torno de 267 m. Os solos dos pivôs são heterogêneos, possuindo manchas de LATOSSOLO Vermelho Amarelo e PLINTOSSOLO (EMBRAPA, 2013). O relevo dos pivôs é plano.

O histórico de área dos pivôs se resume aos últimos 7 anos, sendo basicamente composto por plantio de soja e feijão (Tabela 1).

Tabela 1. Histórico de área dos pivôs 126 ha (I) e 80 ha (II) respectivamente no município de Sucupira - TO, 2014.

Ano	Manejo e utilização do solo
Pivô 126 ha (I)	
2008	- calagem, gradagem, plantio de soja e feijão
2009	- plantio de soja e feijão
2010	- gradagem, subsolagem, plantio de soja e feijão
2011	- plantio de soja e feijão
2012	- plantio de soja e feijão
2013	- calagem, gradagem, plantio de soja, sorgo e feijão
2014	- plantio de soja, milho e feijão
Pivô 80 ha (II)	
2008	- calagem, gradagem e plantio de soja
2009	- plantio de soja
2010	- plantio de soja
2011	- plantio de soja
2012	- plantio de soja e feijão
2013	- calagem, gradagem, plantio de soja, sorgo e feijão
2014	- plantio de soja, milho e feijão

Em junho de 2011 foi instalado o pivô central na área 80 ha (pivô II), o qual começou a operar em 2012, depois da safra 2011/2012 de soja. No ano de 2014, foi o 1º ano de cultivo de milho, como 2ª safra. A coleta de dados, resistência à penetração e umidade do solo foi realizada no mês de março de 2014, após a colheita de soja já durante o plantio de milho (2ª safra).

Para avaliação da resistência mecânica do solo à penetração, foi utilizado penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf, seguindo método proposto por STOLF et al. (1983), que fornece resultados da força por unidade de área (kgf cm^{-2}) e depois multiplicados pela constante 0.098, para transformação em MPa (BEUTLER et al., 2001). Os resultados foram tabulados nas camadas de 0-0.10; 0.10-0.20; 0.20-0.30; 0.30-0.40 m. A umidade do solo foi obtida em campo, no momento da avaliação da RP em cada ponto, utilizando um medidor de umidade do solo por ondas eletromagnéticas modelo HidroFarm 2030 da marca Falker® na camada 0-0.20 m.

Para geoestatística, foram coletados dados em 83 pontos georreferenciados numa malha amostral regular de 165 x 150 m, com três repetições, estas, coletadas num raio de 5 m ao redor do ponto.

Um GPS da marca Garmin® foi utilizado para identificar os pontos em campo. No pivô I, foram coletados 51 pontos, no pivô II, 32 pontos foram coletados, com isso, obteve-se 1 ponto para cada 2,47 ha. Para a determinação do IDE (índice de dependência espacial) ou ADE (avaliador de dependência espacial), que é a proporção em porcentagem do efeito pepita (Co) em relação ao patamar ($\text{Co} + C$), foi utilizada a proposta de cálculo onde a dependência é fraca para valores menores que 25%; moderada entre 25% e 75%, e forte para valores maiores 75%. As análises geoestatísticas foram realizadas utilizando o programa GS+ (GAMMA DESIGN SOFTWARE, 2000) e a interpolação dos dados realizadas pelo método de krigagem para a confecção dos mapas através do programa computacional Surfer 8 (GOLDEN SOFTWARE, 2002).

Resultados e discussão

A análise estatística descritiva da umidade do solo e da resistência à penetração (RP) do pivô I, (Tabela 2) e do pivô II (Tabela 3) revela que valores de RP cresceram das camadas superficiais às camadas mais profundas em ambos os pivôs com valores médios de 1.27 à 3.03 MPa no pivô I e 1.3 à 3.6 MPa no pivô II.

Tabela 2. Estatística descritiva dos valores de umidade do solo (%) e resistência à penetração (RP) do pivô I nas camadas de 0-0,20 m e 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 m, respectivamente, no município de Sucupira-TO, 2014.

Estatística Descritiva	Unidade	RP(Mpa)			
		0-0,10m	0,10-0,20m	0,20-0,30m	0,30-0,40m
Média	20,01	1,27	2,14	2,8	3,03
Mediana	20,4	1,19	1,85	2,26	2,45
Variância	27,52	1,05	0,44	1,13	1,39
Mínimo	9,6	0,96	1,25	1,77	1,78
Máximo	30,1	1,87	3,89	5,25	6,09
CV (%)	26%	17%	30%	37%	38%
Assimetria	-0,06	0,93	1,19	1,17	1,34
Curtose	-0,68	-0,08	0,21	-0,15	0,36

CV=Coefficiente de Variação

Tabela 3. Estatística descritiva dos valores de umidade do solo (%) e resistência à penetração (RP) do pivô II nas camadas de 0-0,20 m e 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 m, respectivamente, no município de Sucupira-TO, 2014.

Estatística Descritiva	Unidade	RP(Mpa)			
		0,0-0,10m	0,10-0,20m	0,20-0,30m	0,30-0,40m
Média	21,95	1,3	2,11	2,82	3,06
Mediana	21,7	1,24	1,91	2,41	2,4
Variância	21,68	0,09	0,36	2,11	4,85
Mínimo	11	0,98	1,5	1,85	1,44
Máximo	29,9	2,57	4	9,58	13,43
CV (%)	21%	23%	28%	51%	71%
Assimetria	-0,39	2,25	1,52	3,32	3,42
Curtose	-0,4	6,36	1,69	12,09	12,79

CV=Coefficiente de Variação

Como as áreas avaliadas sofrem intenso cultivo ao longo do ano, avaliar a RP é uma maneira de identificar a intensidade de mecanização agrícola e o manejo do solo. Segundo BAVER et al. (1973) e GOMES et al. (1992), pressões exercidas a partir das camadas superficiais sobre as subjacentes provocam o adensamento, reduzindo a sua porosidade, assim como a movimentação de material de menor granulometria dos horizontes superiores para os inferiores, mais conhecido como iluviação, o que também pode contribuir para a redução do espaço poroso e aumento da densidade. Quanto à dinâmica, a compactação da camada superficial está associada a área de contato pneu-solo das máquinas agrícolas e à pressão interna dos respectivos pneus, já a compactação em profundidade está diretamente

relacionada à carga radial (BOTTA et al., 2008). OLIVEIRA FILHO et al. (2015) num trabalho de delineamento de manejo de compactação de solo em área de cana de açúcar, também observou valores crescentes de RP com médias de 0,94 à 7,45 MPa da camada 0-0,05 m à 0,35-0,45 m respectivamente.

Ainda quanto aos valores médios de RP, pesquisadores divergem sobre o limite crítico, SENE et al. (1985), 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; GRANT e LANFOND, (1993) afirmam que o crescimento radicular de culturas anuais sofre restrição com valores de RP acima de 1.5 a 3.0 MPa; CAMARGO e ALLEONI (1997) comentam que valores acima de 2.5 MPa começam a restringir o pleno crescimento das raízes

das plantas; MORAES et al. (2014) sugerem aumentar o limite de RP de 2.0 para 3.5 MPa em solos de textura mais argilosa cultivados em plantio direto.

Os valores médios encontrados estão dentro ou próximo dos valores aceitáveis sem restrição ao crescimento de raízes, contudo, valores máximos variaram de 1.87 à 6.09 MPa no pivô I e 2.57 à 13.43 MPa no pivô II. Tais valores já poderiam comprometer o bom rendimento de culturas anuais, contudo, um dos solos encontrados em ambos os pivôs foi o PLINTOSSOLO e durante a coleta de dados, foram avistados cascalhos de petroplintita, uma mistura de argila que é pobre em C orgânico e rica em Fe, ou Fe e Al. com quartzo e outros materiais em sua forma endurecida (EMBRAPA, 2013). Tal ocorrência pode ter interferido na leitura da RP. NIKKEL e LIMA (2014) também verificaram tal evento ao analisar espacialmente por meio da geoestatística a RP em uma área irrigada por pivô central no Sul do Tocantins, obtendo valores máximos de 5.35 à 23.4 MPa.

A respeito da umidade de solo, os pivôs apresentaram médias de 20.01 % e 21.95 % nos pivôs I e II, respectivamente. O pivô II apresentou maior percentual de umidade que o pivô I, contudo, os valores mínimos e máximos de RP na camada 0.0-0.10 m e 0.10-0.20 m do pivô II foram superiores aos do pivô I, isso pode ser um indício de compactação. GUBIANI et al. (2014) num estudo onde simulavam limites de densidade do solo em função da taxa e do tempo de extração de água e o efeito destes fatores na dinâmica da resistência mecânica, esta, em função da demanda hídrica, comentam que, um solo com baixa densidade é poroso, e o aumento da densidade converte poros grandes em poros menores, aumentando o volume de poros que permanecem ocupados com água, até o instante em que o aumento da densidade provoca diminuição também no

volume de poros que permanecem preenchidos com água.

Quanto ao CV, os valores foram ascendentes à medida que as camadas se aprofundaram em ambos os pivôs, chegando a valores de 51% e 71% nas camadas 0.20-0.30m e 0.30-0.40m, respectivamente. CARVALHO et al. (2013) também obtiveram valores altos de CV ao avaliar atributos físicos do solo, como RP, na cultura do café, contudo, observaram o inverso, com maiores valores de CV nas camadas superficiais às camadas mais profundas.

No pivô II, Tabela 3, os valores da curtose da RP em todas as camadas não foram tão próximas de zero, revelando maior dispersão de dados, fato que pode ser observado pelos valores máximos e mínimos. Por outro lado, no pivô I, valores da curtose foram próximas de zero em todas as camadas, revelando proximidade da distribuição de frequência de dados normal. Em pesquisas com ciência do solo, curtoses mais distantes de zero são frequentes. GUIMARÃES et al. (2016) num experimento que visava avaliar a variabilidade espacial de atributos físicos de três classes de solo ocupadas por pastagem, observaram valores de curtose com variação de 2.54 à 14.15. GREGO et al. (2011), numa pesquisa sobre a variabilidade espacial da condutividade elétrica do solo e das cotas topográficas em área cultivada com cana-de-açúcar sob sistema de plantio direto no interior de São Paulo, observaram na camada 0-0.30 m valores de 12.46 de curtose. Já para a umidade, valores de curtose, em ambos os pivôs, foram próximos de zero. ZANETTE et al. (2007) num experimento em que visavam avaliar a variabilidade espacial da umidade no solo, em duas profundidades, sob sistemas de plantio direto e convencional na cultura da soja, também verificaram valores próximos de zero, com variação de valores de -1.18 à 0.38.

Analisando os resultados do semivariograma ajustado do pivô I (Tabela 4) e II (Tabela 5) quanto à umidade e resistência à penetração (RP), observa-se variação de modelos experimentais.

Tabela 4. Parâmetros ajustados ao semivariograma de umidade do solo e resistência à penetração (RP) do pivô I nas camadas de 0-0,20 e 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,3 0-0,40m respectivamente.

Parâmetro	Unidade		RP(Mpa)		
	0.0-0.20m	0.0-0.10m	0.10-0.20m	0.20-0.30m	0.30-0.40m
Modelo	Gaussiano	Exponencial	Gaussiano	Gaussiano	Gaussiano
Efeito Pepita (Co)	0,0001	0,00049	0,00141	0,0001	0,0001
Patamar (C + Co)	0,082103	0,29411	0,079905	0,11187	0,11262
Variância (C)	0,082003	0,029362	0,078495	0,11177	0,11252
Alcance (a)	185,32	255,00	592,36	268,16	303,1
R ²	0,73	0,65	0,82	0,81	0,86
SQR	0,001052	0,000072825	0,002763	0,002579	0,001546
ADE	99%	98%	98%	99%	99%

R²=coeficiente de determinação; SQR =soma dos quadrados desvios; ADE=avaliador da dependência espacial;

Applied Research & Agrotechnology v.10, n.1, jan/apr. (2017)

Print-ISSN 1983-6325 (On line) e-ISSN 1984-7548

Tabela 5. Parâmetros ajustados ao semivariograma de umidade do solo e resistência à penetração (RP) do pivô II nas camadas de 0-0,20 e 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 m, respectivamente, no município de Sucupira-TO. 2014.

Parâmetro	Unidade		RP(Mpa)		
	0,0-0,20m	0,0-0,10m	0,10-0,20m	0,20-0,30m	0,30-0,40m
Modelo	Esférico	Gaussiano	Gaussiano	Exponencial	Exponencial
Efeito Pepita (Co)	0,001036	0,0017	0,0041	0,0001	0,001
Patamar (C + Co)	0,056326	0,0425	0,059103	0,12899	0,21882
Variância (C)	0,05529	0,0408	0,055003	0,12889	0,21782
Alcance (a)	272,6	305,7	480	401,1	282,3
R ²	0,62	1	0,98	0,9	0,54
SQR	0,00004713	0,00006465	0,00002131	0,0004933	0,0008585
ADE	0,98	0,96	0,93	0,99	0,99

R²=coeficiente de determinação; SQR =soma dos quadrados desvios; ADE=avaliador da dependência espacial;

No pivô II, para umidade, o melhor modelo ajustado foi o esférico, já para RP, na camada 0-0,10 m o melhor ajuste foi o gaussiano; camada 0,10-0,20 m o modelo esférico e nas camadas 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m o modelo exponencial foi o mais adequado. Já no pivô I, o modelo gaussiano teve melhor ajuste, com exceção da RP na camada 0-0,10 m onde o modelo exponencial melhor se ajustou. ALVARENGA et al. (2011), CAMPOS et al. (2013) e ARAÚJO et al. (2014) em trabalhos com atributos de solo, observaram que os modelos esféricos e exponenciais tem melhor ajuste, logo, se apresentam como modelos mais comuns atribuídos ao comportamento do solo, evento bem observado no pivô I, mas não no pivô II.

Quanto ao alcance, os valores estão igual ou abaixo do valor do raio dos respectivos pivôs (625 m

para o pivô I e 480 m para o pivô II) e acima dos valores do espaçamento da malha amostral. PANOSSO et al. (2008) comentam que o alcance é um parâmetro importante no estudo do semivariograma, pois representa a distância máxima em que pontos da mesma variável estão correlacionados espacialmente. Já valores menores que o espaçamento da malha amostral revelam a independência do evento. A umidade do solo do pivô II apresentou maior valor quando comparado ao pivô I, assim, a umidade possui maior dependência no pivô II que no pivô I. Para a RP, os valores variaram entre 282,3 à 480 m no pivô II e 255 à 592,36 m no pivô I. A Figura 1 mostra os mapas de krigagem quanto à umidade dos pivôs I e II respectivamente.

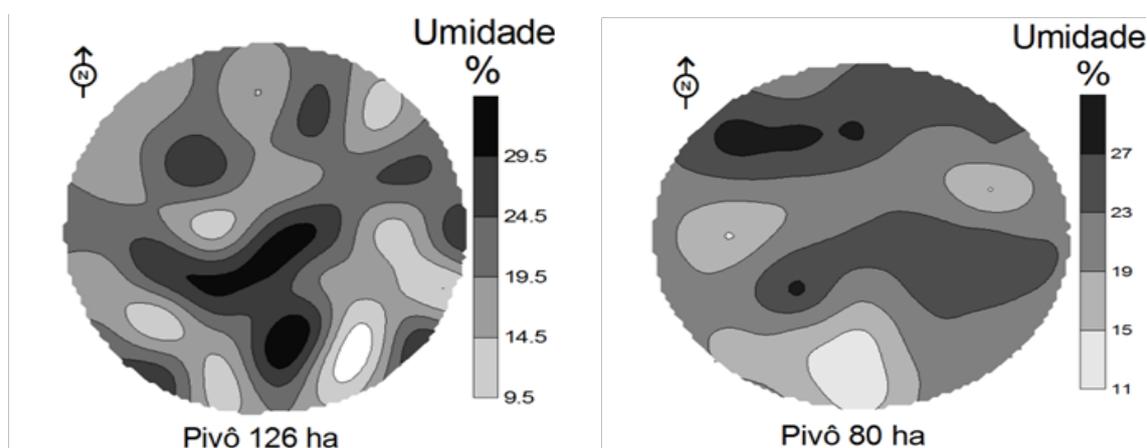


Figura 1. Mapa de Krigagem da umidade do solo na camada 0 - 0,20 m nos pivôs I (126 ha) e II (80 ha) no município de Sucupira-TO, 2014.

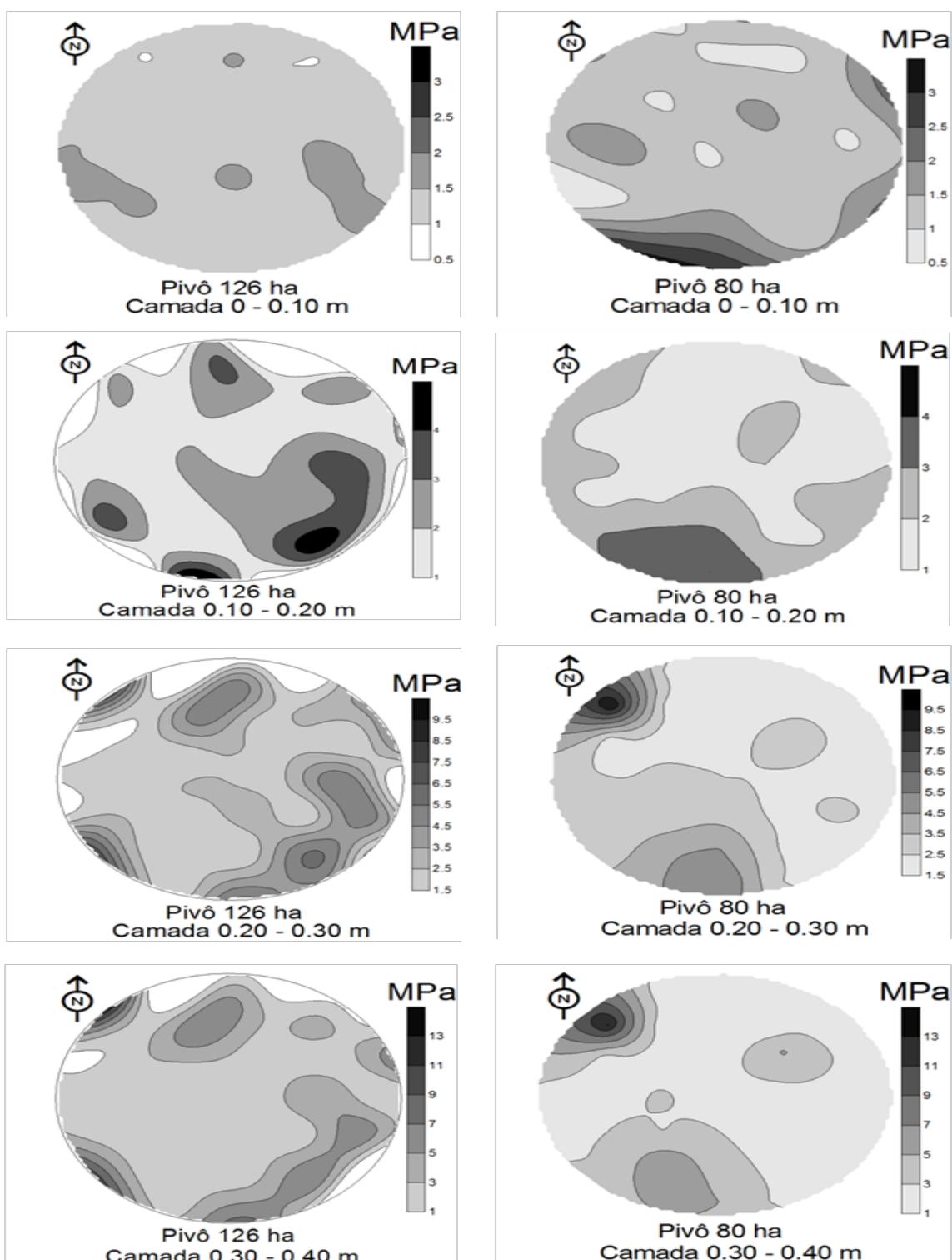


Figura 2. Mapas de krigagem da RP dos pivôs I (126 ha) e II (80 ha) no município de Sucupira-TO, 2014.

Sobre o coeficiente de determinação (R^2), a variação foi de 0.65 à 0.86 no pivô I e 0.54 à 1.00 no pivô II. A soma dos quadrados do resíduo (SQR) foram baixos em ambos os pivôs. R^2 e SQR são parâmetros utilizados para ajustar os modelos de semivariograma, buscaram-se valores mais altos de R^2 e valores mais baixos de SQR. A respeito do avaliador de dependência espacial (ADE), em ambos os pivôs,

tanto na umidade como na RP, os semivariogramas ajustados revelaram forte espacial. Em trabalhos realizados por LIMA et al. (2008) e MARTINS et al. (2010) avaliando a RP, os parâmetros ajustados aos semivariogramas também revelaram forte dependência espacial. A Figura 2 mostra os mapas de krigagem da RP dos pivôs I (126 ha) e II (80 ha) no município de Sucupira-TO, 2014.

Conclusões

Os valores de resistência do solo à penetração estão nos limites críticos onde causariam restrição ao crescimento radicular nas camadas 0.20-0.30 e 0.30-0.40 m.

A resistência do solo à penetração é crescente, da camada mais superficial à mais profunda, em ambos os pivôs.

Agradecimentos

Ao Engenheiro Agrônomo Álvaro Vicente de Rosso, gerente geral da Fazenda Universo, pelo total apoio e suporte durante a condução do experimento.

Referências

- ALVARENGA, C. C.; MELLO, C. R.; MELLO, J. M.; VIOLA, M. R. Continuidade espacial da condutividade hidráulica saturada do solo na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5, p. 1745-1758, 2011. DOI:10.1590/S0100-06832011000500029
- ARAÚJO, D. R.; MION, R. L.; SOMBRA, W. A.; ANDRADE, R. R.; AMORIM, M. Q. Variabilidade espacial de atributos físicos em solo submetido à diferentes tipos de uso e manejo. **Revista Caatinga**, v. 27, n. 2, p. 101 - 115, 2014.
- BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDENER, W. R. **Soil structure: classification and genesis**. In: BAVAR, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDENER, W. R. Soil physics. New York, John Wiley, p. 130-177, 1973.
- BEUTLER, A. N.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; FERREIRA, M. M.; PEREIRA FILHO, I. A.; CRUZ, J. C. Agregação de Latossolo Vermelho Distrófico Típico relacionada com o manejo na região dos cerrados no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 129-136, 2001. DOI: 10.1590/S0100-06832001000100014
- BLAINSKI, E.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; GUIMARÃES, R. M. L. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 975-983, 2008. DOI: 10.1590/S0100-06832008000300007
- BOTTA, G. F.; RIVERO, D.; TOURN, M.; MELCON, F. B.; POZZOLO, O.; NARDON, G.; BALBUENA, R.; BECERRA, A. T.; ROSATTO, H.; STADLER, S. Soil compaction produced by tractor with radial and cross-ply tyres in two tillage regimes. **Soil and Tillage Research**, v. 101, p. 44-51, 2008. DOI:10.1016/j.still.2008.06.001.
- BOTTA, G. F.; RIVERO, D.; TOURN, M.; MELCON, F. B.; POZZOLO, O.; NARDON, G.; BALBUENA, R.; BECERRA, A. T.; ROSATTO, H.; STADLER, S. Soil compaction produced by tractor with radial and cross-ply tyres in two tillage regimes. **Soil and Tillage Research**, v. 101, p. 44-51, 2008. DOI:10.1016/j.still.2008.06.001.
- CAMARGO, O. A. de; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba, ESALQ/USP, 1997. 132p.
- CAMBI, M.; HOSHIKA, Y.; MARIOTTI, B.; PAOLETTI, E.; PICCHIO, R.; VENANZI, R.; MARCHI, E. Compaction by a forest machine affects soil quality and *Quercus robur* L. seedling performance in an experimental field. **Forest Ecology and Management**, V. 384, 15 January, p. 406-414, 2017. DOI.org/10.1016/j.foreco.2016.10.045

- CAMPOS, M. C. C.; AQUINO, R. E.; OLIVEIRA, I. A.; BERGAMIM, A. C. Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração e umidade do solo em área cultivada com cana-de-açúcar na região de Humaitá, Amazonas, Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 8, n. 2, p. 305-310, 2013. DOI:10.5039/agraria.v8i2a2091
- CARVALHO, L. C. L.; SILVA, F. M.; SILVA FERRAZ, G. A.; SILVA, F. C.; STRACIERI, J. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo e características agronômicas da cultura do café. **Coffee Science**, v. 8, n. 3, p. 265-275, 2013.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed, Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2013. 353p.
- FERREIRA, A. D.; ARAÚJO, A. R.; MACEDO, M. C. M. Resistência do solo à penetração em sistemas de produção tradicionais e de integração lavoura-pecuária-floresta. In: 14º Encontro Nacional de Plantio Direto na Palha, Bonito. 2014. Anais.
- GAMMA DESIGN SOFTWARE. **GS+ for Windows. Demonstration version**. Michigan: Gamma Design Software, 2000.
- GOLDEN SOFTWARE. **Surfer for Windows version 8.0**. Colorado: Golden, 2002.
- GOMES, A. dos S.; CUNHA, N. S. da; PAULETTO, E. A. **Solos de Várzea: Uso e Manejo**. In: MARCANTONIO, G. Solos e irrigação. Porto Alegre: Editora da Universidade, p.64-79, 1992.
- GRANT, C. A.; LANFOND, G. O. The effects of tillage systems and crop sequences on soil bulk density and penetration resistance on a clayey soil in Southern Saskatchewan. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 73, n. 2 p.223-232, 1993. DOI: 10.4141/cjss93-024
- GREGO, C. R.; RABELLO, L. M.; BRANCALÃO, S. R.; VIEIRA, S. R.; OLIVEIRA, A. **Geoestatística aplicada a condutividade elétrica do solo e altitude do solo cultivado com cana-de-açúcar**. In: INAMASU, R. Y.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V. de; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. de C. (Ed.). Agricultura de precisão: um novo olhar. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2011.
- GUBIANI, P. I.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Valores críticos de densidade do solo avaliados por condições de contorno. **Ciência Rural**, v. 44, n. 6, p. 994-1000, 2014. DOI:10.1590/S0103-84782014000600007
- GUIMARÃES, W. D.; GRIPP JUNIOR, J.; MARQUES, E. A. G.; SANTOS, N. T.; FERNANDES, R. B. A. Variabilidade espacial de atributos físicos de solos ocupados por pastagens. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 47, n. 2, p. 247-255, 2016. DOI:10.5935/1806-6690.20160029
- HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, v.82, n. 2, p. 121-145, 2005. DOI: 10.1016/j.still.2004.08.009
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. **Censo Agropecuário 2006 Brasil, Grandes Regiões e Unidades da Federação. Segunda apuração**. Rio de Janeiro, 2012.
- LIMA, J. S. S.; OLIVEIRA, P. C.; OLIVEIRA, R. B.; XAVIER, A. C. Métodos geoestatísticos no estudo da resistência do solo à penetração em trilha de tráfego de tratores na colheita de madeira. **Revista Árvore**, v. 32, n. 5, p.931-938, 2008. DOI:10.1590/S0100-67622008000500018
- MARTINS, A. L. S.; MOURA, E. G.; CAMACHO-TAMAYO, J. H. Spatial variability of infiltration and its relationship to some physical properties. **Ingeniería e Investigación**, v. 30, n. 2, p.116-123, 2010.
- MORAES, M. T.; SILVA, V. R.; ZWIRTES, A.; CARLESSO, R. Use of penetrometers in agriculture: a review. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 1, p. 179-193, 2014. DOI:10.1590/S0100-69162014000100019
- MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. Critical limits of soil penetration resistance in a rhodic Eutrudox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 1, p. 288-298, 2014. DOI:10.1590/S0100-06832014000100029

- NIKKEL, M.; LIMA, S. O. Spatial analysis of penetration resistance on irrigated area in south of Tocantins - Brazil. In: The 20th World Congress of Soil Science, Jeju-Korea. 2014. Annals. P4-172.
- OLIVEIRA, J. S.; ZOCOLER, J. L. Custos da irrigação e receita líquida do feijoeiro em um sistema pivô central sob variação do comprimento da tubulação de recalque e desnível topográfico. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 1, p. 121-128, 2013. DOI:10.1590/S0100-69162013000100013
- OLIVEIRA FILHO, F. X.; MIRANDA, N. O.; MEDEIROS, J. F.; SILVA, P. C. M.; MESQUITA, F. O.; COSTA, T. K. G. Zona de manejo para preparo do solo na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 2, p. 186-193, 2015. DOI:10.1590/1807-1929/agriambi.v19n2p186-193
- OLIVEIRA, P. D. D.; SATO, M. K.; LIMA, H. V. D.; RODRIGUES, S.; SILVA, A. P. D. Critical limits of the degree of compactness and soil penetration resistance for the soybean crop in N Brazil. **J. Plant Nutr. Soil Sci.**, v. 179, n. 1, p. 78-87, 2016. DOI:10.1002/jpln.201400315
- PANOSSO, A. R.; PEREIRA, G. T.; MARQUES JÚNIOR, J.; LA SCALA JÚNIOR, N. **Engenharia Agrícola**, v. 28, n.1 p.227-236, 2008. DOI: 10.1590/S0100-69162008000200003
- RICHART, A.; TAVARES FILHO, A.; BRITO, O. R.; LLANILLO, R. F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 26, n. 3, p. 321-344, 2005.
- SANTANA, A. V.; FERREIRA, E. M.; GUIMARÃES, L. E.; CALIL, F. N.; TSAI, H. M. Resistência à penetração em solo sob sistema integração lavoura-pecuária-floresta, pasto convencional e mata nativa do cerrado. **Enciclopédia Biosfera**. Centro Científico Conhecer, v. 10, n. 18, p. 2675, 2014.
- 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**, v. 49, n. 1, p. 422-427, 1985. DOI: 10.2136/sssaj1985.03615995004900020030x
- STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V. L. **Recomendação para uso do penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar** - Stolf. R. STAB - Açúcar. ÁlcoolSubpr.. 1. 1-10. 1983.
- ZANETTE, S. V.; SAMPAIO, S. C.; SILVESTRE, M. G.; BOAS, M. A. V.; URIBE-OPAZO, M. A.; QUEIROZ, M. M. F. Análise espacial da umidade do solo cultivado com soja sob dois sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 3, p. 239-247, 2007. DOI:10.1590/S1415-43662007000300001
- YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos + aplicações**. São Paulo: oficina de textos, 2013. 216 p.