

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO SOB COLHEITA MECANIZADA DE CAPIM-BUFFEL NO AGRESTE PERNAMBUCANO**

Pedro Henrique Dias Batista¹, Gledson Luiz Pontes de Almeida², Uilka Elisa Tavares³, Vitor Nepomuceno do Nascimento⁴ & Roger Moura Sarmento⁵

1- Tecnólogo em Irrigação e Drenagem, Mestrando no programa de Engenharia Agrícola na UFRPE/Recife-PE, giga_pedro@hotmail.com;

2- Engenheiro Agrícola e Ambiental, Professor Adjunto – UFRPE/Recife-PE, Depto de engenharia agrícola - DEAGRI, gledson@deagri.ufrpe.br;

3- Engenheira Agrícola e Ambiental, PNPD – UFRPE/Recife-PE, Departamento de engenharia agrícola - DEAGRI, uetavares@yahoo.com.br;

4- Engenheiro Agrícola e Ambiental, UFRPE/Recife-PE, nepomuceno.vitor@hotmail.com;

5- Tecnólogo em Mecatrônica Industrial, Professor Adjunto – IFCE/Iguatu-CE, Departamento de tecnologia, rogerms@ifce.edu.br.

Palavras-chave:

beerkan

compactação

geoestatística

RESUMO

Estudos sobre a qualidade física do solo evoluíram expressivamente ao longo dos últimos anos, principalmente em áreas cultivadas sob pastagens. Os objetivos deste estudo foram identificar o grau de dependência espacial de atributos físicos e físico-hídricos de um Neossolo Regolítico distrófico em área de colheita mecanizada. O estudo foi conduzido na Fazenda Roçadinho localizada no município de Capoeiras região Agreste do Estado de Pernambuco. A área de estudo é formada por pastagem de capim Büffel (*Cenchrus ciliaries* L.) a mais de 6 anos, colhido mecanizadamente. Foram coletadas amostras indeformadas para análise da umidade, densidade, densidade de partículas, porosidade total e resistência a penetração, em que se investigaram três camadas de solo (0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m), além da condutividade hidráulica do solo, na camada superficial, que foi determinada pelo método de Beerkan. Utilizou-se 36 pontos de amostragem, em grid de 6 x 6 m. Os dados obtidos foram submetidos à análise geoestatística, para avaliação da dependência espacial das propriedades do solo. A distribuição normal foi verificada em todas as variáveis estudadas. O coeficiente de variação foi classificado como baixo para todas as variáveis avaliadas, mostrando uma distribuição com baixa heterogeneidade dos dados. Os atributos apresentaram forte dependência espacial.

Keywords:

Beerkan

compaction

geostatistics

SPATIAL VARIABILITY PHYSICAL ATTRIBUTES OF THE SOIL UNDER BUFFEL GRASS MECHANICAL HARVESTING IN THE AGRESTE OF PERNAMBUCO STATE**ABSTRACT**

Studies on soil physical quality have evolved significantly over the past few years, especially in areas under pasture. The objectives of this study were to identify the spatial dependence degree in the physical and hydraulic properties of a dystrophic Regolithic Neosol. The study was conducted at the Roçadinho Farm located in the municipality of Capoeiras in the Agreste region of the Pernambuco state. Mechanically harvested buffelgrass (*Cenchrus ciliaries* L.), with over 6 years of age, compose the study area. In order to analyze the soil moisture content, density, particle density, total porosity and penetration resistance, three soil layers (0.00-0.10, 0.10-0.20 and 0.20 -0.30 m) were collected, in addition to the hydraulic conductivity of the superficial layer of the soil, which was determined by the Beerkan method. Thirty-six sampling points were used in a 6 x 6 m grid. The data were submitted to geostatistical analysis to evaluate the spatial dependence of soil properties. Normal distribution was verified in all variables studied. The coefficient of variation was classified as low for all evaluated variables, indicating a distribution with low data heterogeneity. All the attributes presented strong spatial dependence.

INTRODUÇÃO

A região semiárida do Nordeste brasileiro apresenta precipitação irregular, altas taxas de evaporação, solos rasos e escassos recursos hídricos. Essas características climáticas, pedológicas e hidrológicas inibem o desenvolvimento da agricultura na região (SANTOS *et al.*, 2012).

Estudos sobre a qualidade física do solo evoluíram expressivamente ao longo dos últimos anos, uma das justificativas é a necessidade de se avaliar o comportamento de diversas características, principalmente em áreas cultivadas sob pastagens (SPERA *et al.*, 2009; SALES *et al.*, 2010). Diferentes atributos do solo têm sido empregados para caracterizar as modificações físicas resultantes da sua compactação, causadas quase sempre pela pressão exercida pelo tráfego das máquinas agrícolas, pelo pisoteio dos animais ou, ainda, pelos diferentes sistemas de preparo e manejo. Os parâmetros utilizados comumente são a densidade e porosidade do solo (CARVALHO *et al.*, 2014), a infiltração de água (ROMEIRO *et al.*, 2014) e a resistência do solo à penetração (TAVARES *et al.*, 2014).

No contexto de infiltração de água, a compactação do solo é responsável pela diminuição da taxa de infiltração e pelo aumento do escoamento superficial das águas provenientes das chuvas e irrigação, que pode potencializar os processos erosivos (SOUZA *et al.*, 2007).

Os preceitos de manejo do solo apresentam ampla influência nas características físicas do solo e estão relacionados com a compactação, que é um processo de densificação na qual há um aumento da resistência do solo à penetração, reduzindo sua porosidade, permeabilidade, bem como a disponibilidade de água e nutrientes. A resistência mecânica do solo à penetração pode limitar o crescimento e o desenvolvimento do sistema radicular das plantas e diminuir a produtividade das culturas. Conforme Moraes *et al.* (2014) a resistência de 2 MPa é comumente definida como limitante para o desenvolvimento das raízes no solo.

O conhecimento da umidade do solo é fundamental em estudos agrônômicos, hidrológicos, pedológicos e ambientais. É

particularmente importante em estudos ligados ao sistema solo-planta-atmosfera (MARTINEZ *et al.*, 2013). A umidade ao longo dos perfis de solo proporciona uma variabilidade importante nos domínios espacial e temporal, que pode levar a manejos impróprios da água do solo (HU *et al.*, 2008). Conforme ASAE (1999) a resistência a penetração é fortemente influenciada pela umidade e densidade do solo.

A aplicação de técnicas geoestatísticas por meio da krigagem contribui para o conhecimento adequado dos parâmetros de amostragem, como o número de amostras e a distribuição e quantidade das amostras, assim, a compreensão da variabilidade espacial das propriedades do solo também é crucial para garantir uma gestão adequada e estratégias de amostragem do solo (Aquino *et al.*, 2015; Bogunovic *et al.*, 2015).

Neste aspecto, objetivou-se avaliar a dependência espacial da umidade, densidade, densidade de partículas, porosidade total, resistência mecânica à penetração e condutividade hidráulica do solo saturado em um Neossolo Regolítico Distrófico no agreste Pernambucano, utilizando a estatística descritiva e a geoestatística para análise dos dados.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido na Fazenda Roçadinho, uma propriedade comercial de criação de bovinos de leite localizada no município de Capoeiras, Microrregião do Vale do Ipojuca e Mesorregião Agreste do Estado de Pernambuco, situada na latitude sul de 8° 36', longitude oeste de 36° 37' e altitude de 700m. O clima é caracterizado como semi árido, do tipo Bsh na classificação de Köppen, com temperatura média anual de 22,1 °C e pluviosidade média anual de 588 mm (BARROS *et al.*, 1998). A área de estudo é formada por pastagem de capim Búffel (*Cenchrus ciliaries L.*) a mais de 6 anos, colhido mecanizadamente, e solo classificado como Neossolo Regolítico distrófico (MORRILL *et al.*, 2012).

Foram avaliadas três camadas de solo (0,0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m) na área experimental, conforme malha apresentada na Figura 1, em 36 pontos georreferenciados, em um grid 6 x 6 m. Foram coletadas amostras indeformadas, com auxílio

de um amostrador do tipo Uhland, para análise da umidade, densidade, densidade de partículas, porosidade total, além da resistência a penetração e condutividade hidráulica do solo saturado.

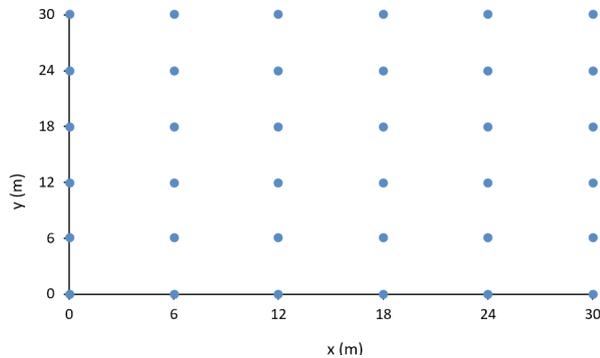


Figura 1. Malha de amostragem.

Para análise física do solo, determinou-se a densidade do solo (Ds) pelo método do anel volumétrico, a umidade (Ug) pelo método gravimétrico em estufa a 105 °C, a densidade de partículas (Dp) pelo método do balão volumétrico e a porosidade total (PT) foi calculada utilizando a Equação 1, (EMBRAPA, 2011) :

$$PT = \frac{Dp - Ds}{Dp} \times 100 \tag{1}$$

em que,

PT = Porosidade total (%);

Dp = Densidade de partículas (kg dm⁻³);

Ds= Densidade do Solo (kg dm⁻³).

A resistência à penetração do solo (RP) foi medida com um penetrômetro de impacto modelo Stolf, (STOLF, 1991) em que a avaliação da RP foi realizada a partir da contagem do número de golpes necessários para introdução de 0,10 m (golpes por 0,10 m) da haste do penetrômetro, até uma profundidade final de 0,30 m. Com o número de impactos transformado em resistência dinâmica (MPa) por meio da equação 2, sugerida por Stolf (1991).

$$Rp = (5,6 + 6,89 \times N) \times 0,098 \tag{2}$$

em que,

Rp = Resistência a penetração (MPa);

N = Número de impactos (dm⁻¹).

A partir dos resultados de resistência à penetração, estas foram classificadas conforme a Tabela 1, adaptada de SOIL SURVEY STAFF (1993).

Tabela 1. Classes da resistência à penetração

Classes	RP (MPa)
Baixa	<0,1
Moderada	0,1 – 2,0
Alta	> 2,0
Muito Alta	4,0 – 8,0

Para caracterização da infiltração de água no solo foi utilizado o método de Beerkan, que baseia-se, principalmente, em ensaios de infiltração simplificados e na análise da distribuição dos tamanhos das partículas do solo (HAVERKAMP et al., 1994). Em que inicialmente, se limpa o terreno para evitar possíveis distorções nas leituras, crava-se o cilindro (150 mm) na superfície do solo à uma profundidade de aproximadamente 1 cm para prevenir perdas laterais de água durante o processo de infiltração. Em seguida são preparados quinze volumes com 150 ml de água, que são vertidos no cilindro. O primeiro volume é vertido no cilindro e imediatamente após o esvaziamento do cilindro, outro volume de água é despejado em seu interior, anotando-se sempre o tempo que cada volume leva para infiltrar no solo, as leituras cessam quando as velocidades de infiltração tendem a ser constante ou após o esvaziamento do decimo quinto volume (HAVERKAMP et al., 1994). Posteriormente, para a determinação da condutividade hidráulica em solo saturado foi utilizada a metodologia desenvolvida por BAGARELLO et al. (2012) Equação 3.

$$kfs = \frac{b}{0,467 \left(\frac{2,92}{r \alpha} + 1 \right)} \tag{3}$$

em que,

Kfs = Condutividade hidráulica em solo saturado (mm.s⁻¹);

b = Coeficiente angular da reta da equação linearizada da função de infiltração acumulada no tempo cronometrado;

r = Raio do anel, 75 mm;

α = 0,012, conforme sugerido por Reynolds et al. (2002), para utilização de prática de permeâmetros e infiltrômetros em solos que variam de areias grossas a argilas compactadas.

A estatística descritiva foi aplicada às variáveis estudadas, antes da análise geoestatística, para obtenção da média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação, assimetria e curtose. Para análise da hipótese de normalidade dos dados foi utilizado o teste kolmogorov–Smirnov ao nível de 5% de probabilidade.

A avaliação da variabilidade dos atributos, medida pelo coeficiente de variação (CV), foi baseada nos limites propostos por Warrick & Nielsen (1980), para classificação de atributos do solo que consideram: variabilidade baixa (CV < 12 %); média (12% < CV < 60 %) e alta (CV > 60 %).

A autocorrelação espacial entre locais vizinhos foi calculada por meio da semivariância $\gamma(h)$, estimada pela Equação 4:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - z(X_i + h)]^2 \quad (4)$$

em que,

$\gamma^*(h)$ = semivariância experimental, obtida pelos valores amostrados $Z(x_i)$, $Z(x_i + h)$;

$N(h)$ = número de pares de valores medidos

h = distância entre pontos amostrais; e

$Z(x_i)$ e $Z(x_i+h)$ = valores da i -ésima observação da variável regionalizada, coletados nos pontos x_i e x_i+h ($i = 1, \dots, n$), separados pelo vetor h .

Os valores de $\gamma(h)$, portanto, são correspondentes às distâncias h , e o gráfico gerado com esses valores é denominado semivariograma. Modelos matemáticos – esférico, exponencial e gaussiano – foram ajustados aos semivariogramas para a visualização da natureza da variação espacial das variáveis com base no R^2 . O ajuste de um modelo teórico ao semivariograma experimental é um dos aspectos mais importantes das aplicações da teoria das variáveis regionalizadas (VIEIRA *et al.*, 1983).

A partir do ajuste de um modelo matemático aos dados, foram definidos os seguintes parâmetros do semivariograma: o efeito pepita (C_0), que é o valor de γ quando $h = 0$; o alcance da dependência espacial (a), que é a distância em que $\gamma(h)$ permanece aproximadamente constante após aumentar com o incremento de h ; e o patamar ($C_0 + C_1$), que é o

valor de $\gamma(h)$ a partir do alcance e que se aproxima da variância dos dados, se ela existir.

A análise do grau de dependência espacial (GDE) foi realizada segundo CAMBARDELLA *et al.* (1994), que preconiza a proporção em porcentagem do efeito pepita (C_0) em relação ao patamar (C_0+C_1) e apresenta: (a) dependência forte < 25%; (b) dependência moderada entre 25 e 75% e (c) dependência fraca > 75%.

As análises geoestatísticas foram realizadas utilizando o programa GS+ versão 7.0 (GAMMA DESIGN SOFTWARE, 2000) e a interpolação dos dados realizadas pelo método de krigagem para a confecção dos mapas com o auxílio do programa computacional Surfer 9 (GOLDEN SOFTWARE, 2010).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos da estatística descritiva encontram-se na Tabela 2. De acordo com o teste de Kolmogorov-Smirnov verificou-se distribuição normal para todas as variáveis estudadas.

O coeficiente de variação, segundo Warrick & Nielsen (1980), apresentou baixa variabilidade para as variáveis D_s , U_g , D_p e PT , em ambas as camadas, corroborando Santos *et al.* (2012) que estudaram a variabilidade espacial de atributos físicos em solos de vale aluvial no semiárido de Pernambuco. E média variabilidade para a RP e K_0 , que corroborou, respectivamente, com Tavares *et al.* (2014) e Mion *et al.* (2012). Segundo Woodbury & Sudicky (1991) a condutividade hidráulica em solo saturado depende do espaço poroso e este parâmetro varia bastante de solo para solo e, também, para o mesmo solo, em função das variações estruturais. Em estudo conduzido por Lima *et al.* (2015) na região do Brejo Paraibano sob Latossolo Amarelo, os autores encontraram baixa variabilidade para a umidade do solo e variabilidade mediana para a resistência à penetração.

Os valores da média e mediana, para todas as variáveis, estão próximos, indicando distribuições simétricas, o que pode ser confirmado pelo coeficiente de assimetria próximo de zero (Tavares

Tabela 2. Parâmetros estatísticos descritivos, relativos aos atributos físicos nas camadas 0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3m

VARIÁVEIS	UNIDADE	MÉDIA	MEDIANA	¹ DP	² CV(%)	ASSIMETRIA	CURTOSE	³ D
0 – 0,10 (m)								
Ds	(kg dm ⁻³)	1,503	1,501	0,072	4,80	-0,287	-0,108	0,059*
Ug	(%)	10,347	9,933	1,248	12,00	0,530	-0,432	0,129*
Dp	(kg dm ⁻³)	2,545	2,570	0,058	2,30	-0,802	0,082	0,182*
PT	(%)	40,905	41,145	3,012	7,40	0,232	-0,332	0,075*
RP	(MPa)	1,543	1,224	0,3424	22,20	0,116	-2,107	0,339*
0,10 – 0,20 (m)								
Ds	(kg dm ⁻³)	1,531	1,527	0,047	3,10	0,558	0,251	0,090*
Ug	(%)	10,048	10,038	1,243	12,00	0,121	-0,600	0,086*
Dp	(kg dm ⁻³)	2,538	2,560	0,061	2,40	-0,752	0,477	0,216*
PT	(%)	39,588	39,837	2,483	6,30	-0,229	-0,350	0,112*
RP	(MPa)	2,162	1,900	0,371	17,2	-0,079	-0,937	0,328*
0,20 – 0,30 (m)								
Ds	(kg dm ⁻³)	1,565	1,578	0,052	3,30	-0,151	0,774	0,126*
Ug	(%)	10,350	10,536	1,411	12,00	0,147	-0,785	0,077*
Dp	(kg dm ⁻³)	2,535	2,530	0,052	2,00	0,087	-0,082	0,182*
PT	(%)	38,790	38,093	3,317	8,60	0,541	-0,170	0,101*
RP	(MPa)	2,124	1,899	0,511	24,00	-0,233	-0,505	0,243*
CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM SOLO SATURADO								
K ₀	(mm s ⁻¹)	0,027	0,023	0,012	43,2	0,685	0,003	0,123*

Ds: Densidade do Solo; Ug: Umidade do solo; Dp: Densidade de partículas; PT: Porosidade total; RP: Resistência à penetração; K₀: Condutividade Hidráulica do solo. (¹DP) Desvio Padrão; (²CV) Coeficiente de Variação; (³D) Normalidade por K-S *Significativo a 5%.

et al., 2014).

A Tabela 3 apresenta os modelos e parâmetros estimados aos semivariogramas experimentais ajustados para os atributos físicos do solo estudado. Os semivariogramas experimentais mostraram a existência de uma estrutura de dependência espacial.

O efeito pepita da maioria das variáveis estudadas apresentaram-se inferior a um. Segundo Cambardella et al. (1994), erros de medição e pequenas variações não detectadas, considerando a distância de amostragem utilizada, podem estar correlacionadas ao efeito pepita. A Ds nas camadas de 0,0-0,1 e 0,2-0,3 m apresentaram efeito pepita puro, ou seja, não foi possível ajustar um modelo

teórico aos semivariogramas experimentais. De acordo com Tavares et al. (2014) o EPP é o resultado da total ausência de correlação espacial entre as variáveis, devido à distância entre os pontos coletados não ser suficiente para detectar seu comportamento espacial, fazendo-se necessário um espaçamento diferente ao utilizado.

No estudo do semivariograma, o alcance é um importante parâmetro, pois representa a distância na qual não há correlação espacial entre os pontos de uma mesma variável. Os alcances variaram entre 5,50 com o menor valor, para porosidade total na camada 0,20-0,30 m, e maior valor 29,314 na camada 0-0,10 m para umidade. Analisando a distribuição espacial de atributos físicos em solo sob pastagem Soares et al. (2015), obtiveram alcance

Tabela 3. Parâmetros dos modelos de semivariograma e grau de dependência espacial (GDE)

ATRIBUTOS	MODELO	C ₀	C ₀ +C	A (m)	GDE %	R ²
0 – 0,10 (m)						
Ds	EPP	-	-	-	-	-
U	Gaussiano	0,500	2,000	29,314	25,00	0,979
Dp	Gaussiano	0,001	0,007	7,742	14,30	1,00
PT	Exponencial	1,390	10,20	9,270	13,63	0,570
RP	Esférico	0,0071	0,1242	8,52	6,00	0,600
0,10 – 0,20 (m)						
Ds	Esférico	0,001	0,012	12,260	8,40	0,951
U	Gaussiano	0,370	1,930	28,412	19,17	0,988
Dp	Esférico	0,00069	0,01148	11,920	6,00	0,872
PT	Exponencial	1,390	11,230	12,960	12,4	0,916
RP	Esférico	0,0070	0,1440	8,66	5,00	0,534
0,20 – 0,30 (m)						
Ds	EPP	-	-	-	-	-
U	Gaussiano	0,590	2,500	27,625	23,60	0,958
Dp	Exponencial	0,000171	0,002672	5,640	6,4	0,460
PT	Exponencial	0,230	11,110	5,550	2,00	0,820
RP	Esférico	0,0050	0,1580	7,13	3,00	0,635
CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM SOLO SATURADO						
K ₀	Exponencial	0,000024	0,000164	16,620	14,64	0,965

Ds: Densidade do Solo; Ug: Umidade do solo; Dp: Densidade de partículas; PT: Porosidade total; RP: Resistência a penetração; K₀: Condutividade Hidráulica do solo; C₀: Efeito Pepita; C₀+C: Patamar; A: Alcance; GDE: Grau de Dependência Espacial (%); R²: Ajuste do semivariograma; EPP: Efeito Pepita Puro.

de 22,50 m para a porosidade total na profundidade 0,20-0,30 m e 33,90 m para a umidade.

O grau de dependência espacial (GDE) foi classificado como forte para todas as variáveis estudadas, resultados similares foram encontrados por Santos et al. (2012) em estudo dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho. De acordo com Cambardella et al. (1994), atributos com forte dependência espacial são mais influenciados por propriedades intrínsecas do solo.

A maior parte das variáveis apresentou coeficiente de ajuste do modelo ao semivariograma (R²) acima de 0,60 (Tabela 3), ou seja, no mínimo 60% da variabilidade existente nos valores da semivariância estimada são explicadas pelos modelos ajustados, ajustes semelhantes foram encontrados por Tavares et al. (2014).

Os parâmetros do modelo de semivariograma selecionados (Tabela 3) e o método de interpolação por krigagem para estimar valores em locais não amostrados foram utilizados para gerar os mapas de contorno da distribuição espacial das variáveis estudadas. Esses mapas facilitam a visualização da espacialização dos atributos e auxiliam no planejamento do manejo da área (SAMPAIO et al., 2010).

A Figura 2 mostra os mapas de krigagem para a porosidade total, umidade e resistência a penetração do solo. Observa-se que ocorreu um acréscimo da RP nos pontos onde se obtiverem as menores percentagens de PT. De acordo com Mion et al. (2012), a porosidade total tem apresentado grande relação com a compactação e a resistência à penetração do solo, as quais tendem a aumentar com a redução do espaço poroso.

A RP variou de 1,2 a 3,2 MPa, apresentando na camada de 0,0-0,1 m média de 1,543 MPa, na camada de 0,1-0,2 m média de 2,162 MPa e na camada de 0,2-0,3 m média de 2,124 MPa, indo de modera a alta ao longo da profundidade. Valores entre 2 e 2,5 MPa têm sido indicados como os limites críticos de resistência do solo à penetração (MORAES et al., 2014)

Também se pode verificar que a RP aumenta, à medida que a profundidade aumenta. Carvalho et al. (2011) atribuíram provável causa da compactação na camada subsuperficial do solo, à pressão exercida em consequência do sistema de colheita mecanizada.

A partir da Krigagem nota-se que na parte superior dos mapas que a RP foi influenciada

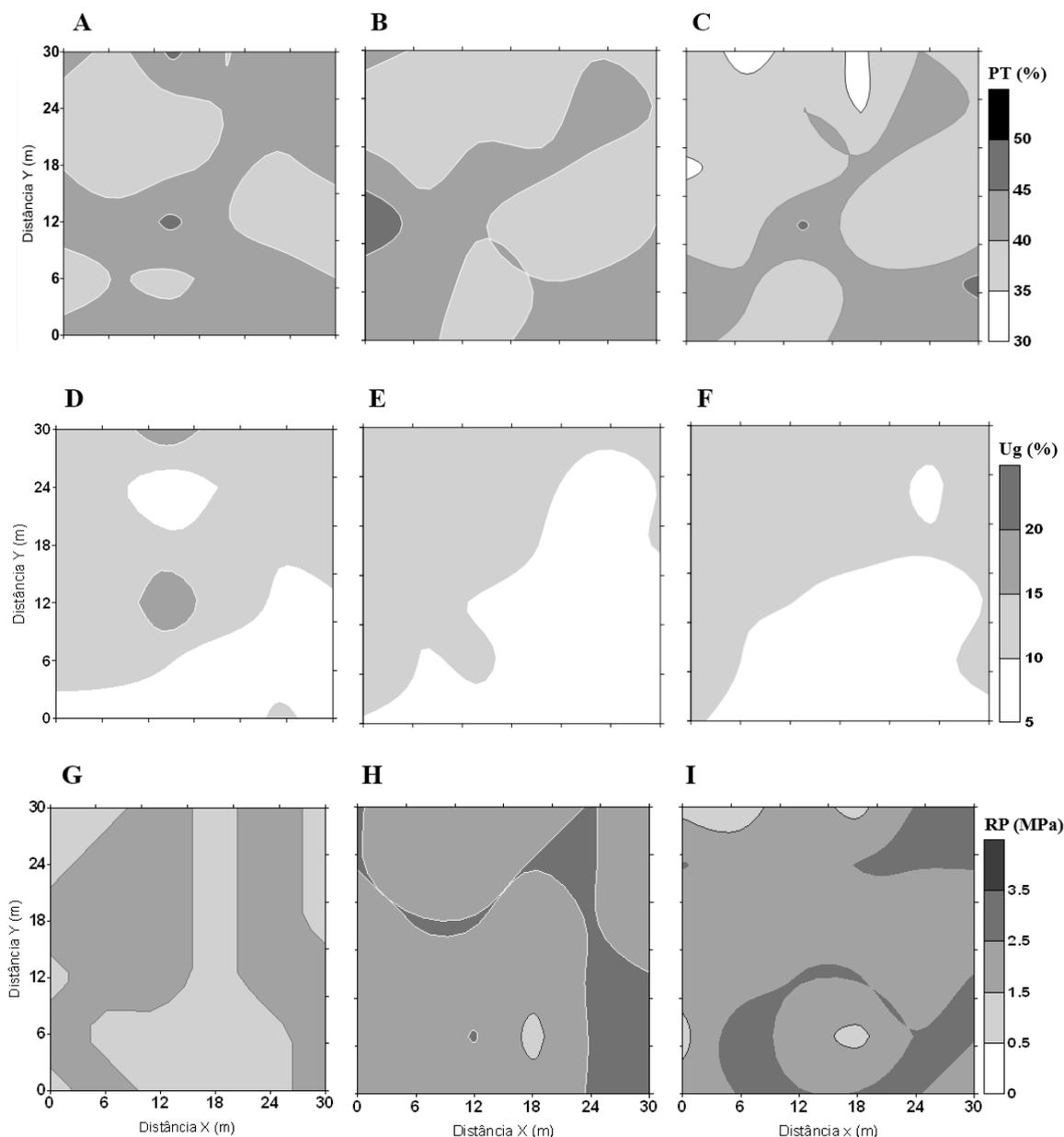


Figura 2. Mapas de krigagem da porosidade total (PT), umidade (U) e resistência a penetração (RP) do solo nas camadas de 0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3m.

A, B, C: Porosidade (%) na camada 0,0 – 0,1; 0,1- 0,2 e 0,2 – 0,3 m respectivamente; D, E, F: Umidade (%) na camada 0,0 – 0,1; 0,1- 0,2 e 0,2 – 0,3 m respectivamente; G, H, I: RP (MPa) na camada 0,0 – 0,1; 0,1- 0,2 e 0,2 – 0,3 m respectivamente.

pela umidade, as baixas variabilidades dos dados na área podem explicar a fraca relação dos dois atributos. Tavares et al. (2014) encontraram uma correlação negativa da umidade com a RP em um Neossolo Flúvico.

A Figura 3 apresenta os mapas de krigagem para a densidade, condutividade hidráulica e densidade de partículas do solo. A densidade do solo na camada 0,1-0,2 m apresentou valores médios de $1,50 \text{ kg dm}^{-3}$. Reinert et al. (2003) indicam que valores de densidade em torno de $1,65 \text{ kg dm}^{-3}$ para solos arenosos e $1,45 \text{ kg dm}^{-3}$ para solos argilosos, associados ao estado de compactação tem alta probabilidade de oferecer riscos de restrição ao crescimento radicular.

Observa-se uma correlação positiva da Ds com a RP na camada 0,1-0,2 m, corroborando Lima et al. (2009) que em estudo realizado sob um Argissolo Vermelho-Amarelo obteve os maiores valores de RP nos pontos de maior densidade.

De acordo com a krigagem se observa uma

relação positiva da K_0 com a porosidade, resultados semelhantes foram encontrados por Ribeiro et al. (2006) que analisando os atributos físicos do solo, influenciados pela distribuição de poros, obtiveram correlação positiva da PT com K_0 para solos sob mata ciliar, mata nativa, mata secundária e pastagem natural.

A Dp obteve como valor máximo $2,64 \text{ kg dm}^{-3}$ e mínimo de $2,40 \text{ kg dm}^{-3}$, corroborando DE OLIVEIRA et al. (2015) que obtiveram densidade de partículas de $2,40 \text{ kg dm}^{-3}$, na profundidade 0,00-0,20 m em solo sob pastagens (*Brachiaria brizanta*) de uso pecuário a mais de 10 anos. Segundo REINERT et al. (2003) os componentes que predominam em solos minerais apresentam valores de densidade das partículas em torno de $2,65 \text{ g cm}^{-3}$, entretanto a presença de matéria orgânica ou óxidos de Fe e Al altos, podem alterar a Dp.

Conforme PIGNATARO NETTO et al. (2009) os atributos físicos que mais influenciam na redução

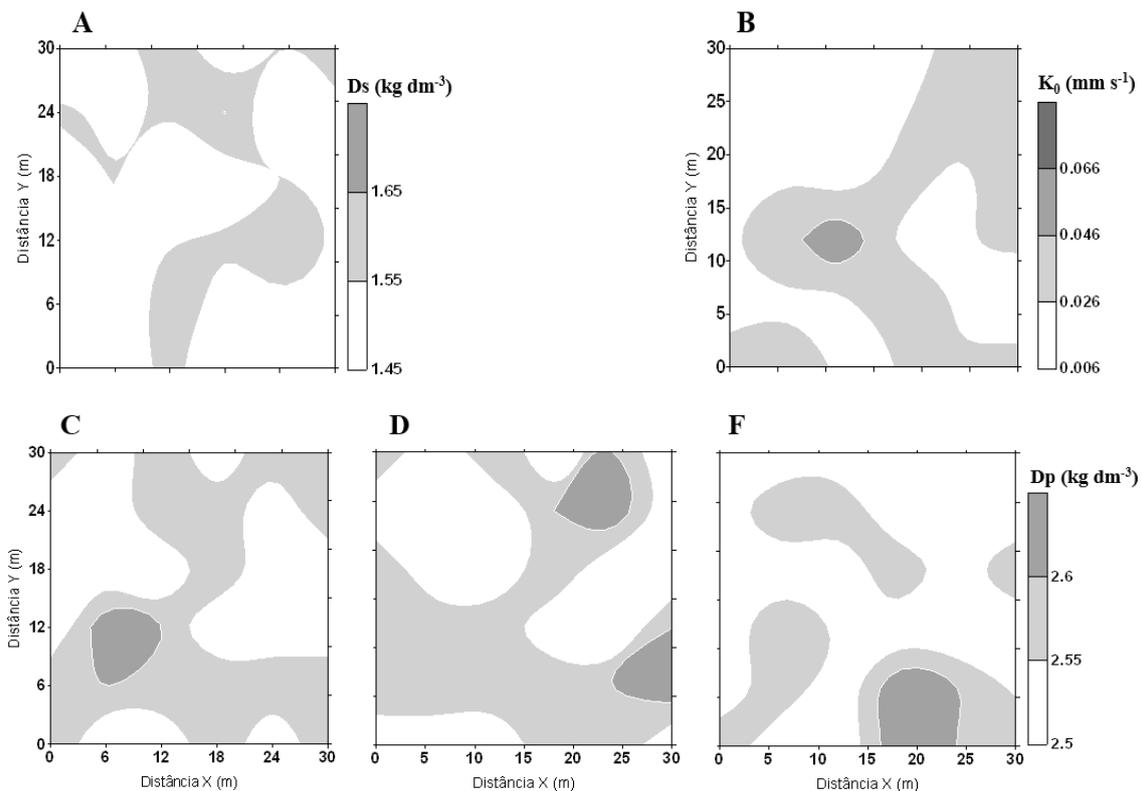


Figura 3. Mapas de krigagem da densidade do solo (Ds) na camada 0,1-0,2 m, condutividade hidráulica em solo saturado (K_0) e densidade de partículas do solo nas camadas de 0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m.

A: Densidade do Solo (kg dm^{-3}) na camada 0,1- 0,2; B: Condutividade hidráulica em solo saturado (mm s^{-1}); C, D, E: Densidade de partículas (kg dm^{-3}) na camada 0,0 – 0,1; 0,1- 0,2 e 0,2 – 0,3 m respectivamente.

da qualidade do solo em estudos de compactação, são D_s , porosidade total e resistência mecânica do solo a penetração.

CONCLUSÃO

- Os atributos físicos do solo estudado apresentaram grau de dependência espacial forte para todas as camadas avaliadas.
- Para as condições de estudo, não foi possível verificar estrutura de dependência espacial para a D_s nas camadas de 0,0-0,1 e 0,2-0,3m.
- A Resistência a penetração e a densidade do solo ficaram abaixo dos limites considerados como críticos para compactação do solo.
- A condutividade hidráulica do solo aumenta à medida que a porosidade total exerce uma maior influência sobre o solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASAE - American Society of Agricultural Engineers. Soil Cone Penetrometer. In: Asae Standards 1999: Standards Engineering Practices Data. 46th (ed.) St. Joseph. p.834-835, 1999.

AQUINO R.E., CAMPOS M.C.C., MARQUES JUNIOR J., OLIVEIRA I.A., TEIXEIRA D.B., CUNHA J.M. Use of scaled semivariograms in the planning sample of soil physical properties in Southern Amazonas Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.3, p.21-30, 2015.

BAGARELLO, V.; LOVINO. M. Testing the BEST procedure to estimate the soil water retention curve. **Geoderma**, Madison, v.187-188, p.67-76, 2012.

BOGUNOVIC, I.; MESIC, M.; BIRKÁS, M. Spatial Variability of Penetration Resistance on Pseudogley. **Agriculturae Conspectus Scientificus**, Zagreb, v.80, p.9-16, 2015.

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 Amsterdam Journal**, Madison, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.

CARVALHO, M.A.; RUIZ, H.A.; COSTA, L.M.; PASSOS, R.R.; ARAUJO, C.A.S. Composição granulométrica, densidade e porosidade de agregados de Latossolo Vermelho sob duas coberturas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina-Grande, PB, v.18, n.10, p.1010-1016, 2014.

CARVALHO, L.A.D.; MEURER, I.; SILVA JUNIOR, C.A.D.; CAVALIERI, K.; SANTOS, C.F. Physical properties of three classes of soils cultivated with sugarcane in mechanized harvesting. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina-Grande, PB, v.15, n. 9, p. 940-949, 2011.

DE OLIVEIRA, I.A.; JUNIOR, J.M.; CAMPOS, M.C.C.; DE AQUINO, R.E.; DE FREITAS, L.; SIQUEIRA, D.S.; DA CUNHA, J.M. Variabilidade Espacial e Densidade Amostral da Suscetibilidade Magnética e dos Atributos de Argissolos da Região de Manicoré, AM. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.39, n.3, p.668-681, 2015.

SANTOS, D.DOS.; SOUZA, E.G.; NÓBREGA, L.H.P.; BAZZI, C.L.; GONÇALVES JÚNIOR, A.C. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho após cultivo de soja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina-Grande, PB, v.16, p.843-848, 2012.

EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 2ª ed. Rio de Janeiro: **Centro Nacional de Pesquisa de Solos**, 230p, 2011.

GOLDEN SOFTWARE. **Surfer for windows version 9.0**. Colorado: Golden, 2010.

HAVERKAMP, R.; ROSS, P.J.; SMETTEM, K.R.J.; PARLANGE, J.Y. Three dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 2. Physically based infiltration equation. **Water Resources Research**, v.30, p.2931-2935, 1994.

- HU, W.; SHAO, M.A.; WANG, Q.J.; REICHARDT, K. Soil water content temporal spatial variability of the surface layer of a Loess Plateau hillside in China. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, SP, v.65, n.3, p.277-289, 2008.
- LIMA, R.P.; SILVA, A.R.; DA SILVA OLIVEIRA, D.M. Análise de trilha de atributos físicos na resistência à penetração de um latossolo amarelo. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia, MS, v.1, n.1, p.65-74, 2015.
- LIMA, J.S.D.S.; SATTLER, M.A.; PASSOS, R.R.; OLIVEIRA II, P.C.; SOUZA, G.S.D. Variabilidade espacial de atributos físicos de um argissolo vermelho-amarelo sob pastagem e vegetação secundária em regeneração natural. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, SP, v.29, p.185-195, 2009.
- MARTINEZ, G.; PACHEPSKY, Y.A.; VERECKEN, H.; HARDELAUF, H.; HERBST, M.; VANDERLINDEN, K.; Modeling local control effects on the temporal stability of soil water content. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.481, p.106–118, 2013.
- MION, R.L.; NASCIMENTO, E.M.S.; SALES, F.A.L.; SILVA, S.F.; DUARTE, J.M.L.; SOUSA, B.M. Variabilidade espacial da porosidade total, umidade e resistência do solo à penetração de um Argissolo Amarelo. Semina: **Ciência Agrárias**, Londrina, PR, v.33, p.2057-2066, 2012.
- MORAES, M.T.D.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J.C.; SILVA, V.R.D. Critical limits of soil penetration resistance in a rhodic Eutrudox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.38, n.1, p.288-298, 2014.
- MORRILL, W.B.B.; ROLIM, M.M.; BEZERRA NETO, E.; PEDROSA, E.M.R.; OLIVEIRA, V.S.; ALMEIDA, G.L.P. Produção e nutrientes minerais de milho forrageiro e sorgo sudão adubado com soro de leite. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina-Grande, PB, v.16, p.182-188, 2012.
- PIGNATARO NETTO, I.T.; KATO, E.; GOEDERT, W.J. Atributos físicos e químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob pastagens com diferentes históricos de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.33, p.1441-8, 2009.
- ROMEIRO, E.R.; BONINI, C.S.B.; Neto, A.B. Infiltração de água no solo sob diferentes usos e manejo. **X Fórum Ambiental da Alta Paulista**, Tupã, SP, v.10, n.7, p.39-49, 2014.
- SALES, L.E.O.; CARNEIRO, M.A.C.; SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; FERREIRA, M.M. Qualidade física de Neossolo Quartzarênico submetido a diferentes sistemas de uso agrícola. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, MG, v.34, p.667-674, 2010.
- SANTOS, K.S.; MONTENEGRO, A.A.A.; ALMEIDA, B.G.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; ANDRADE, T.S.; JÚNIOR, R.V.P.F. Variabilidade espacial de atributos físicos em solos de vale aluvial no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina-Grande, PB, v.16, n.8, p.828–835, 2012.
- SOARES, M.D.R.; CAMPOS, M.C.C.; SOUZA, Z.M.; BRITO, W.B.M.; FRANCISCON, U.; CASTIONE, G.A. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo em área de Terra Preta Arqueológica sob pastagem em Manicoré, AM. **Revista de Ciências Agrárias/Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, Belém, PA, v.58, n.4, p.434-441, 2016.
- SOIL SURVEY Staff. **Soil Survey Manual**. Washington: Usda Scs. U.S. Gov. Print. Office, p.437, 1993.
- SOUZA, E.S.; ANTONINO, A.C.D.; LIMA, J.R.S.; GOUVEIA NETO, C.G.; SILVA, J.M.; SILVA, I.F. Efeito do encrostamento superficial nas propriedades hidráulicas de um solo cultivado. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, PE, v.2, p.69-74, 2007.
- SPERA, S.T.; SANTOS, H.P.; FONTANELI, R.S.; TOMM, G.O. Integração lavoura e pecuária e os atributos físicos de solo manejado sob sistema

plântio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.33, p.129-136, 2009.

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**, Viçosa, MG, v.15, p.229-235, 1991.

TAVARES, U.E.; MONTENEGRO, A.A.A.; ROLIM, M.M.; SILVA, J.S.S.; VICENTE, T.F.S.; ANDRADE, C.W.L. Variabilidade espacial da resistência à penetração e da umidade do solo em Neossolo Flúvico. **Water Resources and Irrigation Management**, Cruz das Almas, BA, v.3, n.2, p.79-89, 2014.

VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Califórnia, v.51, p.1-75, 1983.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic, p.319-344, 1980.

WOODBURY, A.D.; SUDICKY, E.A. The geostatistical characteristics of the Borden Aquifer. **Water Resources Research**, Bolonha, v.27, p.533-546, 1991.