



Avaliação da resistência à penetração em um argissolo vermelho distrófico **Evaluation of resistance to penetration in a red dystrophic argissol**

Pedro Geywson de Souza SIQUEIRA², Maria Gilberlândia Ferreira FERRO²; Valdevan Rosendo dos SANTOS³; Márcio Aurélio Lins dos SANTOS³; Telliane Santos Salgueiro SILVA⁴; Cícero Gomes dos SANTOS³

¹ Engenheiro Agrônomo, Universidade Federal de Alagoas, *Campus* Arapiraca, AL, e-mail: geywson@gmail.com;

² Mestranda em Agricultura e Ambiente – UFAL, *Campus* Arapiraca, e-mail: gilberlandiaferro@gmail.com;

³ Professor do Curso de Agronomia – UFAL, *Campus* Arapiraca. Mestre em Energia da Biomassa. Universidade Federal de Alagoas.

Resumo - Na busca de agricultura de base sustentáveis, faz-se necessário o conhecimento da variabilidade espacial das propriedades físicas do solo. Neste sentido, este trabalho tem o objetivo de avaliar a variabilidade da resistência do solo à penetração, fazendo uso da estatística descritiva. O ensaio foi realizado na área experimental da UFAL – *Campus* Arapiraca. O solo em estudo foi o Argissolo Vermelho distrófico. A área foi demarcada, formando uma malha retangular com pontos equidistantes de 5 x 10 m. Realizou-se o georreferenciamento com auxílio do GPS. A malha conta com seis linhas por oito colunas, num total de 48 pontos, em cada um desses pontos foi determinada a resistência do solo à penetração (RSP) através do penetrômetro de impacto. A transformação dos dados de campo de impactos DM-1 para MPa foi feita pela equação (1): $R(\text{MPa}) = (5,6 + 6,89\text{NI})0,098$ (1) em que: NI = número de impactos dm-1; e 0,098 = fator adicionado na equação para passar os dados de kgf cm^2 para N m^2 (Mpa). Foram feitas análises estatísticas de média, mediana, desvio-padrão, assimetria, curtose e coeficiente de variação dos atributos químicos do solo. A normalidade foi testada através do teste W (Shapiro-Wilk, 1965) a 5% de probabilidade. Os “outliers” foram definidos segundo Libardi et al. (1996). Os métodos geoestatísticos permitem o zoneamento da área em pousio definindo regiões específicas com os maiores níveis de compactação, possibilitando ferramentas para manejo da área.

Palavras-chave: Variabilidade espacial. Penetrômetro. Geoestatística.

Abstract - In the search for sustainable basic agriculture, it is necessary to know the spatial variability of the physical properties of the soil. In this sense, this work aims to evaluate the variability of soil resistance to penetration, making use of descriptive statistics. The experiment was carried out in the experimental area of UFAL - Arapiraca. The soil under study in Dystrophic Red Argissolo. The area was demarcated, forming a rectangular mesh with points equidistant of 5 x 10 meters. The georeferencing was carried out using GPS. The mesh has six lines per eight columns, for a total of 48 points, in each of these points the soil resistance to penetration (RSP) was determined through the impact penetrometer. This determination was made up to the depth of 60 cm. (1): $R(\text{MPa}) = (5,6 + 6,89\text{NI}) 0,098$ (1) where: NI = number of impacts dm- 1; And 0.098 = factor added in the equation to pass the data from kgf cm^2 to N m^2 (Mpa). Statistical analyzes of mean, median, standard deviation, asymmetry, kurtosis and coefficient of variation of soil chemical attributes were done. Normality was tested by the W (Shapiro-Wilk, 1965) test at 5% probability. Outliers were defined according to Libardi et al. (1996). Geostatistical methods allow the zoning of the fallow area, defining specific regions with the highest levels of compaction, allowing tools to manage the area.



Key words: Spatial variability. Penetrometer. Geostatistics.

Introdução

A demanda crescente por alimentos, fibras e biocombustíveis tem levado a intensificação a pressão nos sistemas produtivos, com series consequências sobre as propriedades do solo, principalmente as físicas, ocasionando um aumento da densidade do solo, que representa uma elevação nos níveis de compactação. Onde, o conhecimento da variabilidade das propriedades do solo e das culturas, no espaço e no tempo, é considerado, atualmente, o princípio básico para o manejo preciso das áreas agrícolas, qualquer que seja sua escala.

A preferência em utilizar penetrometro para medir o estado de compactação está na praticidade e rapidez na obtenção dos resultados. Por sua vez, os penetrómetro medem a resistência do solo em pequenos incrementos de profundidade, sendo úteis para avaliar camadas de maior resistência em profundidade e os valores de resistência à penetração são correlacionados com a densidade do solo. VOORHEES et al. (1978, p.347), pesquisando sobre os efeitos do tráfego de máquinas, em um dado solo, verificaram que a resistência a penetração (RP) foi mais sensível como indicador da compactação do que a densidade do solo.

A resistência do solo à penetração (RP) constitui uma das variáveis físicas consideradas na avaliação da qualidade do solo em plantio, envolvendo questionamentos quanto á compactação e a necessidade ou não do revolvimento mecânico deste sistema de manejo para reduzi-la e proporcionar menores restrições ao desenvolvimento radicular das plantas. Com isto, a resistência do solo à penetração é uma das características físicas do solo que mais chama a atenção, pois demonstra o grau de compactação e, conseqüentemente, a facilidade de penetração das raízes no solo.

A compactação do solo pode ocorrer por fatores pedogenéticos (adensamento), porém existem outros fatores que colaboram e influenciam nessa compactação, como o pisoteio de animais e o trânsito de máquinas agrícolas (COSTA et al., 2009, p.242; CAVALIERI et al., 2009, p.482). A compactação tende a levar a uma perda na produtividade agrícola e conseqüente degradação do solo, pois a resistência do solo à penetração aumenta com a compactação do solo.

ISLAM; WEIL (2000, p.76) consideram três grupos de atributos na avaliação da qualidade do solo: o primeiro grupo está relacionado com os atributos denominados efêmeros, que são aqueles que apresentam oscilações em curto espaço de tempo, dentre os quais podem ser citados temperatura, pH, conteúdo de água, respiração do solo e teores de nutrientes; o segundo grupo engloba atributos denominados intermediários, os quais são alterados com o manejo após alguns anos, dentre estes incluem-se conteúdo de matéria orgânica, resistência à penetração do solo e permeabilidade do solo à água, e, por último têm-se os atributos definidos como permanentes, atributos inerentes ao solo, os quais não sofrem alterações a curto prazo, dentre estes podem ser citados componentes mineralógicos, textura, profundidade do solo, camadas de impedimentos e pedoclima.

Os atributos do solo são alterados devido à ausência de práticas conservacionistas atrelado a manejo incorretos das áreas, o que compromete a qualidade produtiva dos solos. Diferentes atributos físicos têm sido usados na quantificação da qualidade física do solo, tais como, a densidade e a porosidade do solo são as mais amplamente utilizadas (ARAÚJO et al., 2010, p.720). E a resistência do solo à penetração (SOUZA et al., 2012), têm sido comumente utilizados como indicadores de qualidade física, pela relativa facilidade de determinação e pelo baixo custo de obtenção das medidas. Estudando a variabilidade espacial do solo e da biomassa de pastagem GRECO et al., (2012, p.173) observaram estrutura de dependência espacial para



determinação da produtividade de *Urochloa brizantha*. Na literatura, autores têm demonstrado a variação espacial de atributos físicos do solo e planta. Correlacionando produtividade de gramíneas com atributos físicos do solo, SOUZA et al., (2010, p.844) observaram dependência espacial em atributos do solo a partir de técnicas de geoestatística. Portanto, conhecer a variabilidade espacial de atributos físicos do solo relacionados a processos responsáveis pela produtividade das culturas é primordial para definição de zonas de manejo específico do solo, visando à sustentabilidade da produção agrícola.

Na busca de agricultura de base sustentáveis, faz-se necessário o conhecimento da variabilidade espacial das propriedades físicas do solo. Neste sentido, este trabalho tem como objetivo avaliar a variabilidade da resistência do solo à penetração, fazendo uso da estatística descritiva.

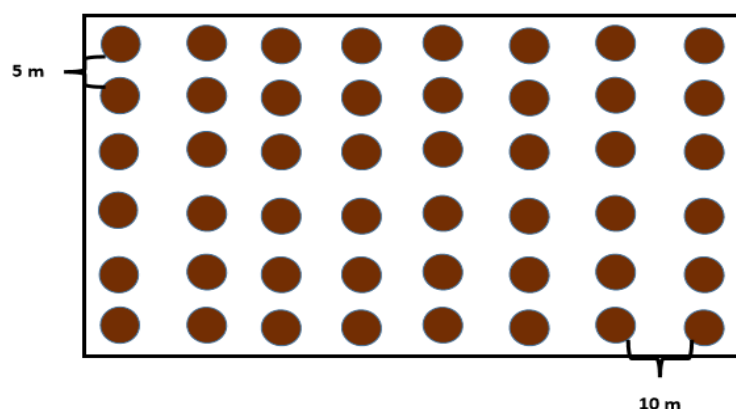
Material e Métodos

O trabalho foi desenvolvido na área experimental da Universidade Federal de Alagoas – *Campus* Arapiraca, na região Agreste de Alagoas, localizado entre as coordenadas geográficas 09° 48' 40,3'' S e 36° 37' 19,7'' W, altitude de 245 m. Esta região é de transição entre a Zona da Mata e o Sertão Alagoano, cujo clima é classificado como do tipo 'As' tropical com estação seca de Verão, pelo critério de classificação de Koppen (1948). O solo em estudo é caracterizado como sendo ARGISSOLO VERMELHO Distrófico.

A área por sua vez, encontrava-se em estado de pousio há pelo menos 10 anos, sendo um ARGISSOLO VERMELHO distrófico, relevo plano estando assim, num período de repouso longo.

A identificação da área foi realizada com auxílio de uma trena métrica e logo em seguida, foi demarcada com piquetes, formando uma malha retangular com quarenta e oito (48) pontos de 5 x 10 metros. O georreferenciamento foi realizado com auxílio de um Sistema de Posicionamento Global (GPS) da marca GARMIN GPS II⁺ Plus. E as coordenadas de cada ponto foram determinadas em UTM (Universal Transversa de Mercator).

Figura 1. Croqui da área experimental na UFAL - *Campus*-Arapiraca.



Fonte: SANTOS, 2017.

Para a análise de resistência mecânica do solo à penetração (RP) utilizou-se um penetrômetro de impacto (Modelo IAA/Planalsucar – STOLF), conforme as recomendações de Stolf et al. (1983, p.8), que provoca impacto com massa de 4 kg quando colocada em curso de queda livre de 40 cm; cone com ângulo sólido de 30° e 1,28 cm de diâmetro, haste com diâmetro



de 0,95 cm. A malha conta com seis linhas por oito colunas, num total de 48 pontos, com limpeza dos pontos para coleta das amostras. Essa determinação foi feita até a profundidade de 60 cm. A transformação dos dados de campo de impactos dm^{-1} para MPa foi feita de acordo com a equação (1):

$$R \text{ (MPa)} = (5,6 + 6,89 \text{ NI}) 0,098 \text{ _____} \text{ (Equação 1)}$$

Em que: NI = número de impactos dm^{-1} ; e 0,098 = fator adicionado na equação para passar os dados de kgf cm^2 para N m^2 (Mpa).

As análises foram realizadas no laboratório de Química do Solo da UFAL – *Campus Arapiraca*. Para verificar a existência de dependência espacial dos atributos físico-químicos do solo estudado, foi realizado por meio da geoestatística (VIEIRA, 2000, p.43). Para se fazer a análise geoestatística é necessário saber se há dependência espacial ou não atributos, o que pode ser verificado por meio do gráfico do semivariograma.

Os semivariogramas são representações gráficas entre a semivariância (h) representada na coordenada Y, em função de uma determinada distância h, representada na coordenada X. A semivariância pode ser estimada pela equação 1, no software GS+ (ROBERTSON, 2008, p.152).

$$s^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

(1) sendo N(h) o número de pares de valores experimentais medidos em Z e Z (xi + h), separados pelo vetor h. Os valores de Z podem ser qualquer um dos parâmetros estudados, enquanto os valores de xi e xi + h são definidos de acordo com as posições dos pontos amostrais no campo.

A seleção dos modelos foi realizada com base no melhor coeficiente de determinação (R^2) e na menor soma de quadrados do resíduo (SQR), sendo testados os modelos esféricos, exponencial, gaussiano, linear, linear sem patamar e efeito pepita puro.

Nos semivariogramas ajustados, foram definidos os seguintes parâmetros: efeito pepita (Co); patamar (Co + C) e alcance da dependência espacial (a). A razão entre o efeito pepita e o patamar $Co/(Co+C)$ permite a classificação e a comparação entre atributos do solo.

Para analisar o grau de dependência espacial dos atributos em estudo, utilizou-se a classificação proposta por CAMBARDELLA et al. (1994, p.1510), modificados por ZAMBACK em que os semivariogramas com dependência espacial forte possuem razão menor ou igual a 25%, os semivariogramas com dependência espacial moderada possuem razão superior a 25% e inferior a 75% e os de dependência fraca possuem razão superior a 75%.

Conhecendo-se o semivariograma da variável em estudo, utilizou-se o método de interpolação, denominado Krigagem, que interpola os valores em qualquer posição no campo de estudo, sem tendência e com variância mínima, permitindo obter um maior detalhamento da área. Para obtenção dos mapas de isolinhas utilizou-se o *software* GS+ (ROBERTSON, 2008, p.152).

A análise descritiva dos dados das variáveis químicas e físicas, foram analisadas por meio da estatística clássica, segundo VIEIRA et al. (2002, p.40), obtendo-se a média, desvio



padrão, variância, valores máximo e mínimo, assimetria e curtose, a fim de se obter uma visão geral do comportamento dos dados. Para análise da hipótese de normalidade dos dados foi utilizado o teste Shapiro-Wilk (W) ao nível de 5% de probabilidade.

Resultados e Discussões

Os valores das medidas descritivas da resistência do solo a penetração nas diferentes profundidades de amostragem estão contidas na tabela 1. Observa-se por meio da análise estatística descritiva que a resistência mecânica do solo a penetração (RP) apresenta aumento das médias e mediana à medida que se aprofunda as camadas de amostras, com exceção da profundidade de 0,00 – 0,10 m, que apresentam valores semelhante a camada de 0,30 – 0,40 m. Os valores observados na camada superficial do solo estão muito discrepantes, das demais profundidades de amostragem, nestes casos os dados devem passar por um tratamento que consiste na remoção de valores considerados a “outliers”.

Tabela 1. Análise descritiva da resistência mecânica do solo à penetração (RP) em diferentes profundidades de amostragem.

Coeficientes	Resistência à Penetração (MPa)				
	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	0,30-0,40	0,40-0,50
Média	5,25	2,70	3,50	5,03	6,42
Erro Padrão	0,40	0,12	0,19	0,25	0,40
Mediana	5,05	2,48	3,25	5,05	6,18
Moda	5,05	2,48	3,25	5,05	7,30
Desvio padrão	2,77	0,81	1,29	1,73	2,78
Curtose	4,46	0,23	1,42	-1,10	2,65
Assimetria	1,87	0,60	1,05	0,46	1,58
Máximo Valor	14,05	5,05	7,30	7,30	14,05
Mínimo Valor	1,22	1,19	1,51	1,90	2,24
Shapiro-Wilk (%)	77	95	91	88	78

No estudo da variabilidade espacial dos atributos do solo através da técnica de estatística descritiva, faz-se necessário aplicação de teste de normalidade, que pode ser constatado através de vários testes existentes na literatura, entre eles o teste W (Shapiro-Wilk) a 5% de probabilidade (GOMES, 2005, p.120). Quando se faz uso deste teste, observa-se que alguns valores podem ser bastante afetados pela presença de valores periféricos (candidatos a “outliers”) (LIBARDI, et al. 1996, p.10).

Resultados que apresentam valores fora da normalidade dos dados, podem levar a erros na tomada de decisão no manejo das áreas.

Observando-se os valores de mínimo e de máximo dos dados de resistência mecânica do solo a penetração (RP) (Tabela 1), apresenta um comportamento crescente em relação a profundidade de amostragem, com exceção da profundidade de 0,00 – 0,10 m, que apresentou valores superior as camadas de 0,10 – 0,20 m a 0,30 – 0,40 m, para valores máximos e valor mínimo superior a camada de 0,10 – 0,20 m. existem duas explicações provável, sendo a primeira relacionada ao ponto de valores discrepante, sendo necessário a aplicação da técnica de “outliers”, a outra está relacionada ao período seco da região, que está umidade de solo apresenta na camada inicial bastante endurecida.



Segundo ACCIOLY, (2011, p335) e COELHO et al. (2012, p.760), o coeficiente de curtose (K) é um parâmetro de avaliação em que se observa o grau de achatamento da distribuição, ou seja, o quanto a curva de frequência será achatada em relação a uma curva normal de frequência. Os dados experimentais da resistência do solo a penetração (Tabela 1), apresentam distribuição platecústica ou achatada ($K > 2,63$), nas profundidades de 0,00 – 0,10 m e 0,40 - 0,50 m. Resultado semelhante foi obtido por Coelho et al. (2012, p.760), na profundidade de 0,00 – 0,10 m, estes valores demonstram marcar intervalo de variação entre os dados, distribuídos em menor frequência na classe modal. (Coelho et al.; 2012, p.760). Os demais dados experimentais nas profundidades de 0,10 – 0,20, 0,20 – 0,30 e 0,30 – 0,40 m, apresentam valores inferiores a 2,63, o que caracteriza uma distribuição leptocústica ou alargada, ou seja, os dados caracterizam-se por menor variação e frequência modal mais acentuada (COELHO et al., 2012, p.761; CORADO NETO et al., 2015, p.1357).

Na tabela 1, estão apresentados os valores de assimetria dos dados experimentais de resistência à penetração nas diferentes profundidades de amostragem. Todos os dados experimentais apresentam valores positivos. Os valores de assimetria positiva demonstram haver tendência de concentração dos valores abaixo da média observada, sendo tal tendência tanto mais expressiva quanto maior para o valor obtido; situação reversa se dá para valores negativos desse coeficiente (CORADO NETO et al.; 2015, p.1356).

A assimetria, numericamente pode ser descrita pelo coeficiente de Pearson (Ar), o qual demonstram que os valores da resistência mecânica do solo à penetração em todas as profundidades de amostragem apresentam distribuição assimétrica.

Nas profundidades de amostragem nas camadas de 0,10 – 0,20 m e 0,30 – 0,40 m (tabela 2), foram classificadas como moderada ($0,15 < Ar < 1,0$), enquanto que as demais profundidades de amostragem apresentam valores de assimetria ($Ar > 1,0$), forte. Resultados semelhantes foi obtido por Coelho et al. (2012, p.761) e Rodrigues et al. (2014, p.6).

Tabela 2. Classificação do Índice de Dependência Espacial proposta por Cambardella *et al.* (1994) e modificada por Zimback (2001).

Índice de dependência espacial	Classificação
< 25%	Fraca dependência espacial
25 a 75%	Moderada dependência espacial
> 75%	Forte dependência espacial

Ao analisar as tabelas 1 e 2, verifica-se que independente da profundidade de 0-50 cm todas as camadas mostraram dependência espacial acima de 90%, onde de acordo com CAMBARDELLA et al. (1994, p.1510) e modificada por ZIMBARCK (2001, p.114); mostram que maior que 75% já apresenta forte dependência espacial.

De acordo com a tabela 2 os modelos de ajustes encontrados foram em sua maioria, esférico, apresentando apenas um exponencial na profundidade de 0,30-0,40 m. No entanto, os ajustes não apresentam consideráveis percentuais de significância demonstrados pelos coeficientes de determinação (R^2).

Na tabela 3, encontram-se os modelos de semivariogramas ajustados aos dados experimentais de resistência a penetração nas profundidades de 0 - 10, 10 - 20, 20 - 30, 30 - 40 e 40 – 50cm, bem como o efeito pepita, o patamar, o alcance, e a aleatoriedade (relação efeito pepita/patamar), e o índice de dependência espacial (IDE).

**Tabela 3.** Coeficientes geoestatístico para valores de Resistência a Penetração do solo em diferentes profundidades.

Profundidade (m)	Modelo	R ²	Efeito pepita (Co)	Patamar (Co + C)	Alcance (A)	Aleatoriedade E = (Co/C)	IDE (%)
0,00-0,10	Esférico	0,840	0,010	6,750	8,720	0,001	99,9
0,10-0,20	Esférico	0,760	0,001	0,602	5,000	0,002	99,8
0,20-0,30	Esférico	0,860	0,019	1,657	6,200	0,012	98,9
0,30-0,40	Exponencial	0,620	0,265	3,052	2,880	0,095	91,3
0,40-0,50	Esférico	0,920	0,540	8,214	7,790	0,070	93,4

Os dados experimentais de resistência mecânica à penetração se ajustaram melhor ao modelo esférico e todas as profundidades estudadas, (Tabela3), com exceção da profundidade de 30-40 cm, que se ajustou melhor ao modelo exponencial. Os dados apresentam valores de R² variando de 0,62 a 0,92, onde o melhor ajuste foi obtido utilizando-se o modelo exponencial (R²= 0,92) na profundidade de 0,40 – 0,50 m (Tabela 3, figura 1). Os modelos esférico e exponencial que se ajustaram os dados experimentais desta pesquisa corroboram com resultados de pesquisas publicadas na literatura indicando que esses modelos como os de maior ocorrência para atributos de solo (CRUZ et al., 2010, p.276; CAMPOS et al., 2012, p.14; CORADO NETO et al., 2015, p.1357; RODRIGUES et al., 2014, p.6; COELHO; CORTEZ; OLSZEWSKI, 2012, p.761). Segundo MION et al. (2012, p. 2061), avaliando a variabilidade espacial da resistência à penetração em um Argissolo amarelo de textura arenosa sob pastagem, não encontraram ajuste a nenhum modelo teórico para os semivariogramas nas profundidades estudadas, resultados que diferem desta pesquisa.

Como qualquer outro atributo do solo, a resistência mecânica à penetração pode ter elevada variabilidade espacial.

Os valores do efeito pepita (Co) para os dados experimentais de resistência à penetração aumentam de acordo com a profundidade de amostragem (Tabela 3). Não foi observado efeito pepita puro. Esses resultados sugerem que a distância de amostragem utilizada nesta pesquisa foi adequada para indicar e identificar a variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração em um Argissolo vermelho de textura arenosa, segundo preconiza CAMBARDELLA et al. (1994, p.1510). Fato observado por COELHO; CORTEZ; OLSZEWSKI, (2012, p.761), estudando a variabilidade espacial da resistência mecânica de solo à penetração em um Vertissolo Háplico. Resultados semelhantes foram observados por RODRIGUES et al. (2014, p.6), em pesquisa para determinar a variabilidade espacial de resistência mecânica de solo à penetração em um Argissolo amarelo, na cidade de Petrolina-PE.

O patamar (Co + C), observou-se que os dados de resistência mecânica do solo a penetração seguem um comportamento de aumento dos valores em função da probabilidade de amostragem, com exceção da profundidade de 0,00 – 0,10 m, que obteve valor de 6,750 (Tabela 3). No entanto, o maior valor foi registrado na camada de 0,40 – 0,50 m. resultados semelhantes foram observados por CORADO NETO et al. (2015, p.1357), estudando a variabilidade espacial da resistência mecânica de um Neossolo Litólico Eutrófico à penetração no município de Gilbués – PI.

Um parâmetro importante no estudo dos semivariogramas é o alcance, que significa a



distância máxima que uma variável está correlacionada espacialmente (DAVIS, 1996, p.640).

A variável alcance é um importante parâmetro no estudo dos semivariogramas, pois representa a distância máxima que uma determinada variável está correlacionada espacialmente, ou seja, determinações realizadas a distâncias maiores que os alcances têm distribuição aleatória e, por isso, são independentes entre si, devendo ser aplicada a estatística clássica (MACHADO et al., 2007, p.598; VIEIRA, 2000, p.43). Os valores obtidos nesta pesquisa foram 8,720 m, maior valor, na profundidade de 0,00 – 0,10 m (Tabela 3) e menor valor de 2,880 m na profundidade de 0,30 – 0,40 m (Tabela 3). Todos os alcances estão dentro do limite de amostragem utilizadas nesta pesquisa, utilizou-se uma malha de 5x10 m. Segundo CORADO NETO et al. (2015, p.1357), o alcance da dependência espacial é um parâmetro geoestatístico importante na agricultura para auxiliar o delineamento de futuras amostragens do solo, isto torna-se importante nesta área encontra-se em pousio, pois irá indicar a máxima distância entre as amostras.

Mercante; Uribe-Opazo; Souza, (2003, p.1157), em trabalho semelhante, em Latossolo, obtiveram alcance entre 51 e 91 m nas camadas de 0,00 a 0,10, 0,10 a 0,20 e 0,20 a 0,30 m, utilizando malhas de 7,2 x 7,2 m. Já CARVALHO et al. (2008, p.20) determinaram alcances de 23,03, 36,80 e 12,10 m, respectivamente para as mesmas camadas, em trabalho realizado sob Latossolo, utilizando malha de 20 x 18,2 m. observa-se, portanto, que os efeitos sobre o alcance vão depender do tipo e manejo de cada solo, além da quantidade e distribuição das amostras no campo.

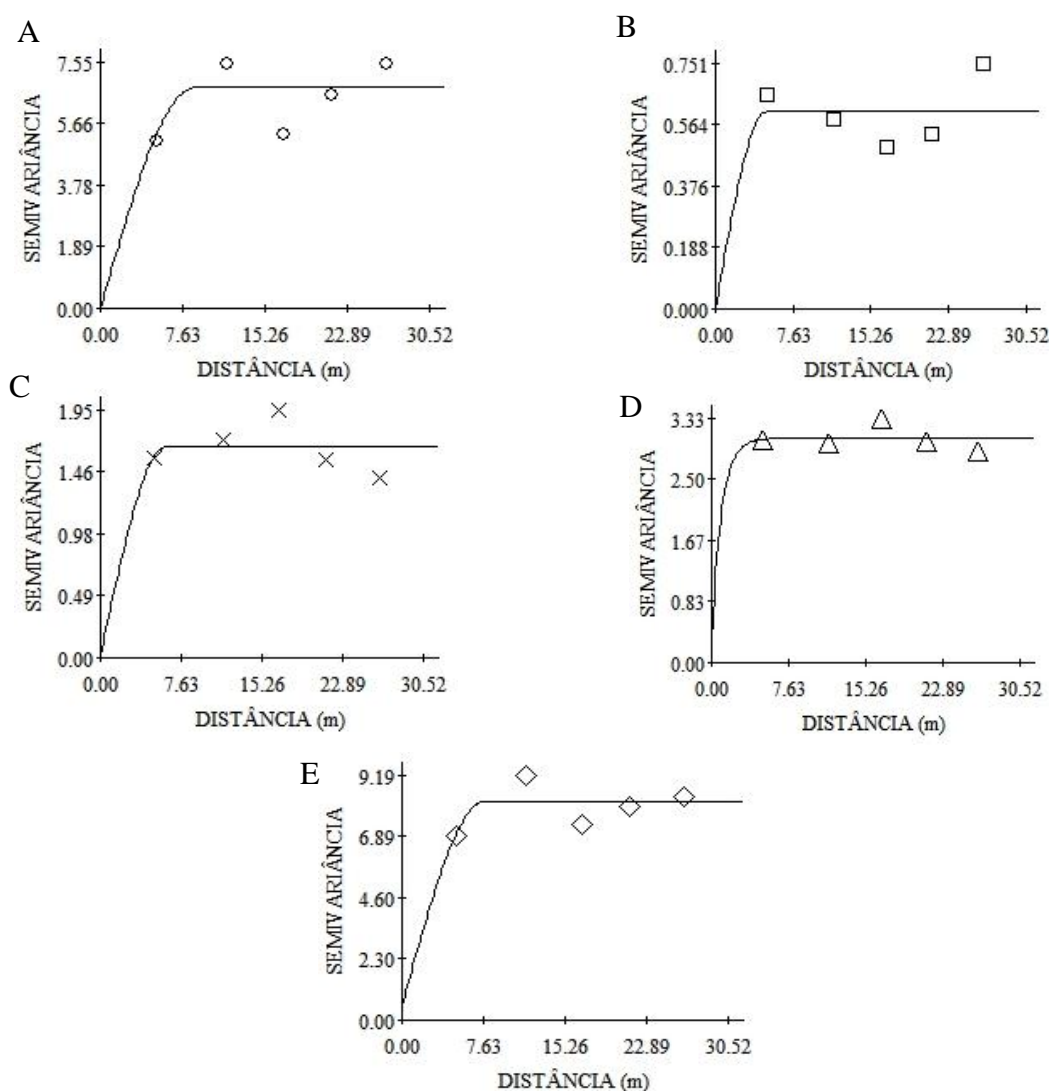
A relação entre o efeito pepita (C_0) e o patamar ($C_0 + C$) do semivariograma indica o grau de dependência espacial dos atributos do solo entre estes a resistência mecânica à penetração (CAMPOS et al., 2012, p.14); DALCHIAVON et al., 2012, p.17; NEVES NETO et al., 2013, p.1002; CORADO NETO et al., 2015, p.1357). Neste estudo, a relação efeito pepita versus patamar evidenciou forte dependência espacial para todas variáveis (Tabela 3), segundo a classificação de CAMBARDELLA et al. (1994, p.1510), modificada por ZIMBACK et al. (2001, p.114), contidos na tabela 2. Isto evidencia, que a distribuição de todos os atributos amostrados no espaço não é aleatório, uma vez que todos apresentaram valores forte para o grau de dependência espacial. Resultados semelhantes foi obtido por Coelho et al. (2012), encontraram dependência forte para resistência á penetração em camadas de 0,00 – 0,30 m, em um Vertissolo Háptico cultivado com a cultura da manga. CAMPOS et al. (2012, p.14), avaliando os atributos do solo em um Cambissolo Háptico cultivado com mandioca, observaram dependência espacial fraca a moderada, o que difere dos encontrados nesta pesquisa.

Conhecendo os semivariogramas dos dados experimentais de resistência mecânica do solo a penetração, havendo dependência espacial entre as amostras, utilizou-se o método de Krigagem, através da construção de mapas de isolinhas obtidos através da interpretação dos dados, para cada profundidade, para cada ponto localizado dentro da grade de amostragem (área de estudo), que regularizará a distância de separação entre amostras em todo o campo, esta é a forma de se visualizar as áreas amostradas, que apresentaram variabilidade espacial.

Na figura 2, estão apresentados os mapas de isolinhas da resistência mecânica de solo à penetração, nas profundidades 0,00 – 0,10 m (figura 5A), 0,10 – 0,20 m (figura 5B), 0,20 – 0,30 m (figura 5C) e 0,30 – 0,40 m (figura 5D) e 0,40 – 0,50 m (figura 5E). Esses mapas facilitam a visualização da distribuição espacial das variáveis e auxiliam no planejamento do manejo da área (Sampaio et al., 2010, p.858; Corado Neto et al. 2015, p.1357).



Figura 2. Semivariograma para Resistência a Penetração nas profundidades de 0-10 (A) 10-20 (B), 20-30 (C), 30-40 (D) e 40-50 cm (E), mostrando o modelo ajustado aos dados em função da distância.



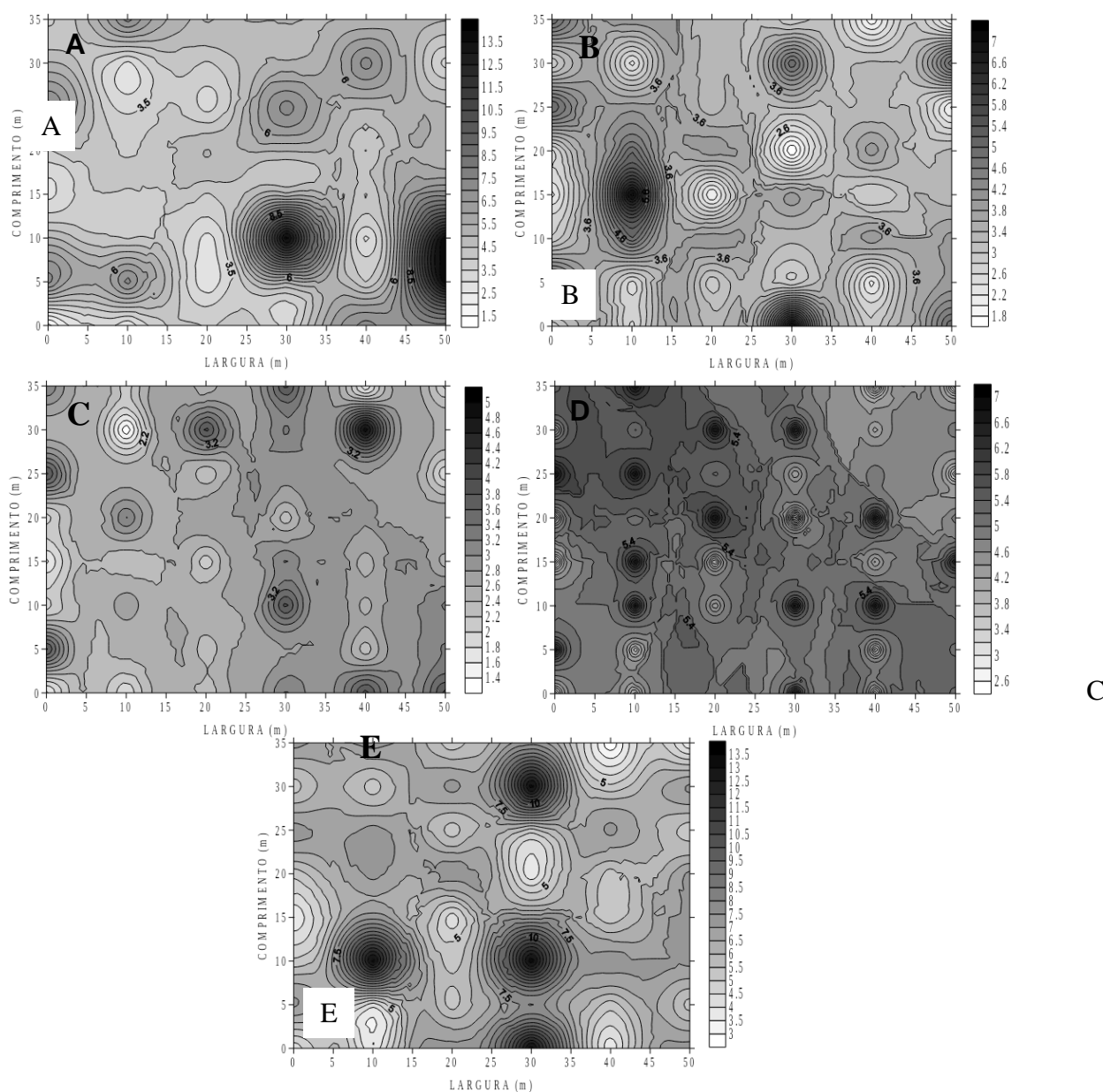
Na figura 2A, os valores da resistência mecânica do solo à penetração variam de muito baixo, com áreas bem definidas, com um aumento da variabilidade espacial na direção do eixo X. Na profundidade de 0,10 – 0,20 m (figura 2B), apresentou um comportamento semelhante a profundidade de 0,00 – 0,10 m, com valores que variam de baixo, com áreas definidas com um aumento de compactação no sentido do eixo do Y.

Nas profundidades de 0,20 – 0,30; 0,30 – 0,40; e 0,40 – 0,50 m (figura 2C, D e E),



apresentaram comportamento semelhantes, com os maiores valores de resistência à penetração, próximas do máximo em pontos pontuais ao longo da área de amostragem. Nos mapas de isolinhas é possível verificar que há zonas na área em que a resistência à penetração atingiu valores que podem ser considerados importantes para solos argilosos.

Figura 3. Mapa da distribuição da Resistência a Penetração nas profundidades de 0-10 (A) 10-20 (B), 20-30 (C), 30-40 (D) e 40-50 cm (E) em 5D.



A figura 3 A, B, C, D e E com suas respectivas medidas: 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 e 40-50 cm representa a distribuição da resistência à penetração nas mais diversas profundidades e larguras.



Para tanto, a figura 3 apresenta um alto grau de resistência, estando assim, em torno de 5 MPa, resistência essa, considerada de acordo com Ribeiro (2009), alto de (4 a 6 MPa). O mesmo classifica a RP sendo baixa (0 a 2 MPa); médio (2 a 4); alto (4 a 6 MPa) e muito alto (acima de 6 MPa).

A figura 2B apresenta uma RP baixa, isso vai em encontro a figura 2 anteriormente mencionada. Onde 1^a apresenta uma elevada resistência assim como a representatividade das demais na figura 3A, B, C, D e E. A figura 3B, apresenta uma camada ideal para o manejo agrícola e são nesses 20 cm que a maioria das culturas agrícolas se desenvolvem, tornando essa camada de solo mais solta, favorecendo a penetração.

Na camada de 20-30 cm o grau de compactação que é representado pela RP é equivalente semelhante apresentando leve variação até os 25 m de largura.

Já a figura 3D de 30-40 cm já apresenta um grau de compactação maior ao longo de toda a profundidade e largura, e essa variação pode ser atribuída pela presença da camada de argila. Sendo assim, de acordo com RIBEIRO (2009, p.69); a RP está muito alta, chegando a uma resistência acima de 6 MPa em todas profundidades e larguras apresentando alto grau de RP por toda área.

No que se refere a figura 2E de 40-50 cm, os pontos de RP aumentam em diâmetro principalmente a partir dos 30 m de largura, a compactação está super alta, atingindo em alguns pontos 13,5 MPa.

Conclusões

Os valores de resistência mecânica do solo à penetração na camada de 0,00 – 0,10 m, apresentam valores muito elevado, o que tem influência nas práticas de manejo da área.

Houve incremento da resistência à penetração com o aumento da profundidade, atingindo níveis máximos principalmente na camada de 0,40 – 0,50 m.

Na camada de 0,00 – 0,10 m, apresentou valores elevados de resistência mecânica do solo à penetração, incomum para camada superficial para uma área em pousio.

A resistência mecânica do solo à penetração apresentou variabilidade espacial ao longo da área, de modo que os valores de alcance ficaram dentro dos intervalos da malha de amostragem.

Os métodos geoestatísticas permitem o zoneamento da área em pousio definindo regiões específicas com os maiores níveis de compactação, possibilitando ferramentas para manejo da área.

Conflito de interesse

Os autores não declararam conflito de interesse para esse manuscrito.

Referências

ACCIOLY, A.M.A.; SIQUEIRA, J.O.; NOVAIS, R.F. Contaminação química e biorremediação do solo. **Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo,**



v.1, p. 299-351, 2011.

ARAUJO, F.S.; SALVIANO, A.A.C.; LEITE, L.F.C.; SOUZA, Z.M.; SOUSA, A.C.M. Physical quality of a Yellow Latosol under integrated crop livestock system. **R. Bras. Ci. Solo**, v.34, n.3, p.717-723, 2010.

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

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, J. M.; NOVAK, 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, p.1501-1511, 1994.

CAMPOS, M.C.C.; OLIVEIRA, I.A.; SANTOS, L.A.C.; AQUINO, R.E.; SOARES, M.R.D. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e umidade em áreas cultivadas com mandioca na região de Humaitá, AM. **Revista Agro@amb**, v.6, p.9-16, 2012.

CARVALHO, L.A.; VALDEMAR NETO, V.J.; SILVA, L.F.; PEREIRA, J.G.; NUNES, W.A.G.A.; Chaves, C.H.C. Resistência mecânica do solo à penetração (rmp) sob cultivo de cana-de-açúcar, no município de Rio Brilhante-MS. **Agrária**, v.1, p.7-22, 2008.

CARVALHO, M. P.; SORATTO, R. P.; FREDDI, O. S. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho distrófico sob preparo convencional em Selvíria, estado de Mato Grosso do Sul. **Acta Scientiarum**, Maringá, v.24, n.5, p.1353-1361, 2002.

CAVALIERI, K. M. V.; SILVA, A. P.; ARVIDSSON, J.; TORMENA, C. A. Influência da carga mecânica de máquina sobre propriedades físicas de um Cambissolo Háplico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.477-485, 2009.

COELHO, D. S.; CORTEZ, J. W.; OLSZEWSKI, N. Variabilidade espacial da resistência mecânica à penetração em vertissolo cultivado com manga no perímetro irrigado de Mandacaru, Juazeiro, Bahia, Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p. 755-764, 2012.

CORADO NETO, F.C.; SAMPAIO, F.M.T.; VELOSO, M.E.C.; MATIAS, S.S.R.; ANDRADE, F.R.; LOBATO, M.G.R. Variabilidade espacial da resistência à penetração em Neossolo Litólico degradado. **Rev. Bras. Ciência do Solo**, v.39, 2015, p.1353-1361.

COSTA, A.; ALBUQUERQUE, J. A.; MAFRA, A. L.; SILVA, F. R. Propriedades físicas do solo em sistemas de manejo na integração agricultura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.235-244, 2009.

CRUZ, J.S.; ASSIS JÚNIOR, R.N.; MATIAS, S.S.R.; CAMACHO-TAMAYO, J.H.; TAVARES, R.C. Análise espacial de atributos físicos e carbono orgânico em Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana de açúcar. **Ci. Agrotec**. V.34, p.271-278, 2010.

DALCHIAVON, F.C.; CARVALHO, M.P.; NOGUEIRA, D.C.; ROMANO, D.; ABRANTES, F.L.; ASSIS, J.T.; OLIVEIRA, M.S. Produtividade da soja e resistência mecânica à penetração



do solo sob sistema de plantio direto no Cerrado Brasileiro. **Pesq. Agrop. Bras.** v.41, p.8-19, 2011.

DAVIS, J.C. Statistics and data analysis in geology. 2.ed. New York: John Wiley, 1986. 646p.

GOMES, N.M. **Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo as sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela na Região do Alto Rio Grande, MG.** 2005. 124f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – UFPA. Lavras, MG.

GREGO, C.R., RODRIGUES, C.A.G., NOGUEIRA, S.F. Variabilidade espacial do solo e da biomassa epigea de pastagem, identificada por meio de geostatística. **Pesq. Agrop. Brasileira, Brasília**, v.47, n. 9, p.1402-1412, 2012.

ISLAM, K.R.; WEIL, R.R. Soil quality indicator properties in mid-Atlantic soils as influenced by conservation management. **J. Soil Water Conserv.**, v.55, p.69-78, 2000.

LIBARDI, P.L.; MANFRON, P.A.; MORAES, S.O.; TUON, R.L. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. **Rev. Bras. Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.20, p.1-12, 1996

LIMA, R. P.; LEÓN, M. J.; SILVA, A. R. Resistência mecânica à penetração sob diferentes sistemas de uso do solo. **Scientia plena**, v.9, n.6, p.1-6, 2013.

MACHADO, L.O.; LANA, A.M.Q.; LANA, R.M.Q.; GUIMARÃES, E.C.; FERREIRA, C.V. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em áreas sob plantio convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.31, n.3, p.591-599, 2007.

MERCANTE, E.; URIBE-OPAZO, M.A.; SOUZA, E.G. Variabilidade espacial e temporal da resistência mecânica do solo à penetração em áreas com e sem manejo químico localizado. **Rev. Bras. Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.27, n.6, p.1149-1159, 2003.

MION, R.L.; NASCIMENTO, E.M.S.; SALES, F.A.L.; SILVA, S.F.; DUARTE, J.M.L.; SOUZA, B.M. Variabilidade espacial da porosidade total, umidade e resistência do solo à penetração de um Argissolo Amarelo. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.33, n.6, p.2057-2066, 2012.

NEVES NETO, D.N.; SANTOS, A.C.; SANTOS, P.M.; MELO, J.C.; SANTOS, J.S. Análise espacial de atributos do solo e cobertura vegetal em diferentes condições de pastagem. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Amb.** v.17, p.995-1004, 2013.

RIBEIRO, C. A.; **Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração em áreas mecanizadas em função do número de cortes da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*)**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, São Paulo, 2009. 69 p.

ROBERTSON, G. P. GS+: **Geostatistics for the environmental sciences**. Gamma Design Software, Plainwell, Michigan USA, p. 165, 2008.



RODRIGUES, M.S.; RAMOS, R.R.D.; AZEVEDO, T.P.; PATROCIO FILHO, A.P.; OLIVEIRA, L.G. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em área de capineira irrigada no semiárido. **Agropecuária Científica no semiárido**, v.10, n.1, p.161-166, 2014.

SAMPAIO, F.M.T.; FERREIRA, M.M.; OLIVEIRA, M.S.; ALMEIDA, A.C.; JOSÉ, M.R. Variabilidade espacial da umidade de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob plantio direto. **Eng. Agríc.** v.30, p.854-861, 2010.

SANTOS, C.G. **Variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos de solo cultivado com cana-de-açúcar em Coruripe-AL.** Dissertação (Mestrado em Manejo de Solo e água) Universidade Federal da Paraíba. Areia, 2004. 86p.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 399-406, 2004.

SOUZA, Z. M.; CERRI, D. G. P.; COLET, M. J.; RODRIGUES, L. H. A.; MAGALHÃES, P.S.G.; MANDONI, R. J. A. Análise dos atributos do solo e da produtividade da cultura de cana-de-açúcar com o uso da geoestatística e árvore de decisão. **Ci. Rural**, Santa Maria, v.40, n.4, p. 840-847, 2010.

SOUZA, G. S.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; ARAUJO, F. S.; BARBOSA, R. S. Compressibilidade do solo e sistema radicular da cana-de-açúcar em manejo com e sem controle de tráfego. **Pesq. Agrop. Brasileira**. v. 47, p. 603-612, 2012.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JUNIOR, J. & PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **R. Bras. Ci. Solo**, 28:937-944, 2004.

STOLF, R.; FERNANDES, J.; URLANI NETO, V. L. **Recomendação para o uso do penetrômetro de impacto - modelo IAA/Planalsucar - Stolf.** São Paulo, MIC/IAA/ PNMCA-Planalsucar, 1983. 8p. (Boletim, 1).

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade especial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V, V.H.; SCHAEFER, C.E.G. (Ed.). Tópicos em ciência do solo. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. 2000, v.1, p.1-54.

VIEIRA, S.R.; MILLETE, J.; TOPP, G.C.; REYNOLDS, W.D. Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and climate data. In: ALVAREZ V.; V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V.; COSTA, L.M. (Eds). Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2002, v.2, p.1-45.

VOORHEES, W. B.; SENST, C. G.; NELSON, W. W. Compaction and soil structure modification by wheel traffic in the northern Corn Belt. **Soil Science Society of America Journal**, v.42, p.344-349, 1978.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de**



Revista Ambiental

Revista da Universidade Estadual de Alagoas/UNEAL

e-ISSN 2318-454X - Ano 10, Maio/Setembro, Vol.2, 2018.

mapeamento da fertilidade do solo. 2001. 114 f. 2001. Tese de Doutorado. Tese (Livre-
Docência)–Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.