

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA RESISTÊNCIA MECÂNICA
DO SOLO À PENETRAÇÃO EM ÁREAS MECANIZADAS
DE CANA-DE-AÇÚCAR (*Saccharum officinarum*).**

Carlos Augusto Ribeiro

Engenheiro Eletricista

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL

2010

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

VARIABILIDADE ESPACIAL DA RESISTÊNCIA MECÂNICA
DO SOLO À PENETRAÇÃO EM ÁREAS MECANIZADAS DE
CANA-DE-AÇÚCAR (*Saccharum officinarum*).

Carlos Augusto Ribeiro

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Angeli Furlani

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo).

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL

Fevereiro de 2010

R484v Ribeiro, Carlos Augusto
Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração em áreas mecanizadas de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*). / Carlos Augusto Ribeiro. – – Jaboticabal, 2010
xiv, 69 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2010

Orientador: Carlos Eduardo Angeli Furlani

Banca examinadora: Danilo Cesar Checcio Grotta, Rouverson Pereira da Silva

Bibliografia

1. Agricultura de precisão. 2. Compactação. 3. Geoestatística. 4. Penetrômetro. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 633.61

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Campus de Jaboticabal.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

CARLOS AUGUSTO RIBEIRO – nascido a 09 de dezembro de 1976 em Araguari – MG. Iniciou o curso de Engenharia Elétrica, ênfase em eletrônica, em Julho de 1995 na Universidade Federal de Uberlândia – MG, concluindo em Julho de 2000. Durante o período de graduação participou como aluno bolsista do Programa Especial de Treinamento PET/CAPEs, desenvolvendo vários projetos de caráter científico. Em 2000 foi admitido na empresa Smar Equipamentos Industriais como engenheiro de desenvolvimento eletrônico, permanecendo até 2006. Neste mesmo ano, ingressou na empresa DLG Automação, situada em Sertãozinho-SP, onde desenvolve projetos relacionados à Agricultura de Precisão. Em março de 2008 iniciou o curso de mestrado em Agronomia (Ciências do Solo) na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP – Câmpus em Jaboticabal – SP.

“Dura Lex, Sed Lex”

“A lei é dura, mas é a lei”

*À minha esposa Daiana
pelo apoio e incentivo.*

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Deus, agradeço pelo dom supremo que é a vida.

Ao Professor Dr. Carlos Eduardo Angeli Furlani, pela compreensão, incentivo, orientação e, sobretudo amizade, que tanto contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Ao Professor Dr. Rouverson Pereira da Silva, pelo apoio para a realização deste trabalho, orientação técnica, e amizade.

Aos colegas de pós-graduação e amigos, Anderson Toledo, José Maria do Nascimento, Danilo Cesar Checchio Grotta, Marcos Sales Rodrigues e a todos os outros pela amizade durante essa caminhada.

À minha família.

À DLG Equipamentos Industriais Ltda., pelo incentivo a pós-graduação, representada pelos amigos Glauco Guaitoli, Antônio Francisco Jaen Lozano, Gilberto Freire Duarte e Paulo Donizete Duarte.

Ao grupo Santa Izabel pela concessão das áreas para o experimento.

Enfim, à todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

Página

RESUMO.....	xiii
SUMMARY	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. Cana-de-açúcar	3
2.2. Compactação do Solo.....	4
2.3. Penetrômetros e Penetrógrafos	6
2.4. Análise estatística espacial	9
3. MATERIAL E MÉTODOS	11
3.1. Área experimental	11
3.1.1. Localização	11
3.1.2. Solo e Clima.....	13
3.2. Preparo e plantio.....	13
3.3. Manejo	13
3.4. Equipamentos	14
3.5. Determinação da malha amostral	16
3.6. Teor de água no solo	20
3.7. Análise estatística descritiva dos dados de RMSP	20
3.8. Análise estatística espacial dos dados de RMSP	20
3.9. Escala de valores de RMSP.....	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
4.1. Histórico de produtividade das áreas experimentais.....	24

4.2.	Avaliação do teor médio de água no solo	24
4.3.	Resistência Mecânica do Solo à Penetração na Entrefileira de Plantio	25
4.3.1.	Análise estatística descritiva	25
4.3.2.	Análise estatística espacial	29
4.4.	Resistência mecânica do solo à penetração na fileira de plantio	42
4.4.1.	Análise estatística descritiva	42
4.4.2.	Análise estatística espacial	45
5.	CONCLUSÃO	58
6.	IMPLICAÇÕES	59
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60
	APÊNDICE	68
	APÊNDICE A: Especificações Técnicas Penetrômetro DLG PNT2000M	68
	TABELA 1A. Características do Penetrômetro PNT2000M.....	68

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

ADE.....	avaliador da dependência espacial
AP.....	agricultura de precisão
ASAE.....	American Society of Agricultural Engineers
Aw	clima tropical com verão chuvoso (Köppen-Geiger)
°C	grau Celsius
C.....	variância estrutural
C ₀	efeito pepita
C1.....	área experimental de primeiro corte
C2.....	área experimental de segundo corte
C3.....	área experimental de terceiro corte
C4.....	área experimental de quarto corte
C5.....	área experimental de quinto corte
C ₀ +C.....	patamar
cm	centímetro
cm ³	centímetro cúbico
cv.....	coeficiente de variação
EMBRAPA.....	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EF.....	entrefileira de plantio
FIL.....	fileira de plantio
GPS.....	Global Positioning System (Sistema de Posicionamento Global)
GS+	programa computacional GS+ 7.0, Gamma Design Software, LLC.
ha	hectare
IC.....	Índice de Cone
kg	quilograma
m	metro
MINITAB.....	programa computacional MINITAB 14.1, Minitab Inc.
mm	milímetro

mm ²	milímetro quadrado
m s ⁻¹	metro por segundo
MPa	megapascal
N	Newton
NMEA	National Marine Electronics Association
psi	libra por polegada quadrada
RMSP	resistência mecânica do solo à penetração
RS232	Recommended Standard 232 (padrão de comunicação serial)
s	segundo
SQR	soma de quadrados residual
Surfer	programa computacional Surfer 8.0, Golden Software, Inc.
ton	toneladas
UNESP	Universidade Estadual Paulista
UTM	Universal Transverse Mercator (sistema de coordenadas geográficas)
W	watt
vc	validação cruzada
Vcc	Tensão em corrente contínua
%	porcentagem
γ	semivariância
Σ	somatório

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
1. Caracterização dos cortes.....	11
2. Descrição das máquinas utilizadas no sistema de colheita e cultivo.....	14
3. Pontos coletados na EF e FIL de plantio.....	17
4. Histórico de produtividade dos cortes.	24
5. Teor de água no solo	25
6. Estatística descritiva de RMSP na EF.....	26
7. Geoestatística de RMSP na EF.....	30
8. Distribuição de áreas nos intervalos de RMSP na EF.....	40
9. Estatística descritiva de RMSP da FIL.	43
10. Geoestatística de RMSP – FIL.	46
11. Distribuição de áreas nos intervalos de RMSP na FIL.	56
1A. Características do Penetrômetro PNT2000M	68

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1. Fazenda Santa Izabel - Talhões utilizados na pesquisa: 03 (C2); 156 (C3); 174 (C5) e 179 (C4).....	12
2. Fazenda Bela Vista - Talhão utilizado na pesquisa: 113 (C1).....	12
3. Penetrômetro eletrônico modelo PNT-2000/MOTOR.....	15
4. Penetrômetro eletrônico PNT2000/Motor acoplado ao quadriciclo.	16
5. Distribuição dos pontos georreferenciados da EF coletados seguindo o espaçamento definido para os cortes: C1 (a); C2 (b); C3 (c); C4 (d) e C5 (e).....	18
6. Distribuição dos pontos georreferenciados da FIL coletados seguindo o espaçamento definido para os cortes: C1 (a); C2 (b); C3 (c); C4 (d) e C5 (e).....	19
7. Curvas de valores médios de RMSP de EF nos cortes 1 a 5.....	28
8. Semivariogramas ajustados do 1º corte (C1) de EF para as profundidades 01-10 (a), 11-20 (b), 21-30 (c), 31-40 (d) e 41-50 cm (e).....	32
9. Semivariogramas ajustados do 2º corte (C2) de EF para as profundidades 01-10 (a), 11-20 (b), 21-30 (c), 31-40 (d) e 41-50 cm (e).....	33
10. Semivariogramas ajustados do 3º corte (C3) de EF para as profundidades 01-10 (a), 11-20 (b), 21-30 (c), 31-40 (d) e 41-50 cm (e).....	34
11. Semivariogramas ajustados do 4º corte (C4) de EF para as profundidades 01-10 (a), 11-20 (b), 21-30 (c), 31-40 (d) e 41-50 cm (e).....	35
12. Semivariogramas ajustados do 5º corte (C5) de EF para as profundidades 01-10 (a), 11-20 (b), 21-30 (c), 31-40 (d) e 41-50 cm (e).....	36
13. Mapas de Espacialização de RMSP média para camadas 01-10, 11-20, 21-30, 31-40 e 41-50 cm dos cortes: 1º corte (a), 2º corte (b), 3º corte (c), 4º corte (d), 5º corte (e).	38
14. Curvas de valores médios de RMSP de FIL dos cortes 1 a 5.	44

15. Semivariogramas ajustados do 1º corte (C1) de FIL para as profundidades 01-10 (a), 11-20 (b), 21-30 (c), 31-40 (d) e 41-50 cm (e).....	48
16. Semivariogramas ajustados do 2º corte (C2) de FIL para as profundidades 01-10 (a), 11-20 (b), 21-30 (c), 31-40 (d) e 41-50 cm (e).....	49
17. Semivariogramas ajustados do 3º corte (C3) de FIL para as profundidades 01-10 (a), 11-20 (b), 21-30 (c), 31-40 (d) e 41-50 cm (e).....	50
18. Semivariogramas ajustados do 4º corte (C4) de FIL para as profundidades 01-10 (a), 11-20 (b), 21-30 (c), 31-40 (d) e 41-50 cm (e).....	51
19. Semivariogramas ajustados do 5º corte (C5) de FIL para as profundidades 01-10 (a), 11-20 (b), 21-30 (c), 31-40 (d) e 41-50 cm (e).....	52
20. Mapas de Espacialização de valores médios de RMSP na fileira de plantio para camadas 01-10, 11-20, 21-30, 31-40 e 41-50 cm das áreas experimentais 1º corte (a), 2º corte (b), 3º corte (c), 4º corte (d) e 5º corte (e).....	54
1A. Cones Tipo 1 e Tipo 2 normalizados pela norma ASAE S313.3.....	69

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO À
PENETRAÇÃO EM ÁREAS MECANIZADAS DE CANA-DE-AÇÚCAR (*Saccharum
officinarum*).**

RESUMO – O uso intensificado de máquinas agrícolas em áreas de cana-de-açúcar contribui para o aumento do estado de compactação do solo e pode ter como consequência a redução de produtividade. O objetivo deste trabalho foi caracterizar a variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração (RMSP) em áreas cultivadas com cana-de-açúcar de primeiro a quinto corte, com manejo totalmente mecanizado. As amostras de RMSP foram coletadas a cada 1 cm até a profundidade de 50 cm, na entrefileira e na fileira de plantio, utilizando-se penetrômetro eletrônico georreferenciado. Em cada área experimental foi determinado um *grid* amostral, sendo cada ponto de ensaio georreferenciado por meio de um receptor GPS acoplado ao penetrômetro. Os dados foram submetidos à análise de estatística descritiva e geoestatística, com o intuito de avaliar o comportamento geral dos dados e a dependência espacial da RMSP. Foram construídos mapas de isolinhas, utilizando o método de krigagem, para identificar áreas com valores de RMSP impeditivos para o desenvolvimento radicular da planta. Constatou-se que a área de primeiro corte não possui valores de RMSP considerados críticos (> 4 MPa) ao desenvolvimento da cana-de-açúcar, ao passo que áreas com segundo corte em diante apresentaram valores críticos em alguma camada de profundidade.

Palavras-Chave: agricultura de precisão, compactação, geoestatística, penetrômetro.

**SPATIAL VARIABILITY OF THE SOIL MECHANICAL RESISTANCE TO
PENETRATION IN AREAS MECHANIZED OF THE SUGARCANE (*Saccharum
officinarum*).**

SUMMARY – The intensified use of agricultural machinery in planting areas of the sugarcane contributes to the increase of the state of soil compaction and may have the effect of reducing productivity. The objective of this work was to study the spatial variability of soil mechanical resistance to penetration (RMSP) in areas cultivated with sugarcane from first to fifth cut, with management fully mechanized. The Samples of RMSP were collected in the between row and row of planting, every 1 cm to a depth of 50 cm, using a penetrometer electronic georeferenced. In each experimental area was given a sample grid, where each point was georeferenced by a GPS receiver attached to the penetrometer. Data were submitted to analysis of descriptive statistics and geostatistics in order to assess the general behavior of the data and the spatial dependence of the RMSP. Maps of isolines were constructed using the kriging method to identify areas with values of RMSP impede the development of the plant root. It was found that the area of the first cut does not have critical values (> 4 MPa) of the RMSP to the development of the sugarcane, while areas with a second cut in front of RMSP showed high values in some layer of depth.

Keywords: precision agriculture, compaction, geoestatistics, penetrometer.

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia da informação, cada vez mais o produtor busca inserir as técnicas de Agricultura de Precisão (AP) dentro da propriedade agrícola. O uso de ferramentas computacionais torna-se um forte aliado do gestor agrícola nas tomadas de decisões diárias, sempre com o intuito de promover eficiência nos processos produtivos, reduzir custos e manter a competitividade. Para isto se faz necessário a implementação de técnicas agrícolas sustentáveis, visando entre outros fatores, à manutenção e melhoria da qualidade do solo.

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) é uma cultura de extrema importância econômica e social para o país. Os principais produtos extraídos desta cultura são o açúcar e o etanol, que possuem significativo peso comercial nas exportações brasileiras, além de suprir um consumo interno considerável. No cenário internacional, existe forte concorrência destes produtos, principalmente com a Índia, atual segundo maior produtor de açúcar no âmbito mundial. Diante disto, o processo produtivo, que começa no campo com o manejo da cultura, e termina nas usinas produtoras, busca inovações tecnológicas a todo o momento, com a finalidade de reduzir custo e aumentar a produtividade. Sabe-se que neste processo, o maior custo da produção concentra-se no campo, ou seja, nas operações de preparo do solo, plantio, cultivo e colheita da cana-de-açúcar. Devido à necessidade de cultivo de grandes áreas com cana-de-açúcar, a intensificação da mecanização agrícola tornou-se inevitável.

Constantemente surgem novas, maiores e pesadas máquinas agrícolas que são introduzidas no campo, com o intuito de suprir as necessidades do manejo em larga escala. Vários autores atribuem o efeito do tráfego intensificado de máquinas pesadas ao aumento da compactação do solo, que pode promover perda de produtividade, devido a seus efeitos negativos na infiltração da água, no perfil do solo e no desenvolvimento das raízes. Desta forma, se faz necessário realizar o

monitoramento do grau de compactação do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar, a fim de identificar áreas consideradas críticas para o correto crescimento da planta e estabelecer medidas de caráter corretivo.

Na administração agrícola, o conhecimento da ocorrência e localização de camadas de solo compactadas, principalmente aquelas que se formam em condições sub-superficiais, é de suma importância para o dimensionamento de equipamentos, para mobilização visando o preparo do solo e para o planejamento conservacionista das propriedades agrícolas.

Atualmente, existem várias técnicas utilizadas para se detectar a compactação do solo, dentre elas a resistência mecânica do solo à penetração (RMSP), a qual apresenta correlação direta com o crescimento das plantas, e, além disto, é mensurada por meio de penetrometria. Esse método proporciona o equilíbrio entre agilidade e confiabilidade para a identificação, que é atributo de cada tipo de solo e seu teor de água, e contribui para representar a condição física do mesmo.

Contudo, considerando que o manejo mecanizado em áreas de cultivo de cana-de-açúcar com diferentes cortes pode interferir sobre as propriedades físico-mecânicas do solo, alterando a RMSP, este trabalho teve como objetivo avaliar a distribuição espacial da RMSP na entrefileira (EF) e fileira (FIL) de plantio da cultura de cana-de-açúcar, em áreas produtoras de primeiro a quinto corte.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar tem quase 500 anos de história no País, sendo que nos últimos 30, graças aos empreendedores do setor sucroalcooleiro, a atividade tomou o leme da eficiência no universo da agroenergia, deixando de ser apenas uma planta alimentícia para se tornar um novo paradigma da energia limpa e renovável, na área dos combustíveis e da eletricidade (JANK, 2007).

A demanda energética no Brasil tem mudado de configuração nos últimos anos. O interesse mundial em diminuir a dependência pelos combustíveis fósseis e diversificar a matriz energética para atenuar o aquecimento global, tem despertado a atenção para os biocombustíveis, em especial para o etanol de cana-de-açúcar produzido no Brasil (SILVA et al., 2009).

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) está entre as culturas mais importantes do agronegócio brasileiro. O Brasil é o maior produtor mundial de açúcar e de álcool de cana-de-açúcar e destaca-se também como o maior exportador, sendo o Estado de São Paulo o maior produtor nacional (SILVA et al., 2008).

A área plantada em 2009 ultrapassou os 8,6 milhões de hectares e a estimativa para 2010 é de 8,78 milhões de hectares, o que representa um crescimento de 0,8 %. A produção brasileira subiu de 317,60 milhões para 686,29 milhões de toneladas no período de 2000 a 2009, com rendimento médio passando de 66,34 para 79,76 toneladas por hectare, sendo que a produção estimada para 2010 é de 691,75 milhões de toneladas (IBGE, 2010).

2.2. Compactação do Solo

A intensificação do uso de máquinas agrícolas pesadas no manejo da cultura de cana-de-açúcar tem como consequência a degradação das condições físicas e principalmente ao aumento da compactação do solo (SOUZA et al. 2006).

De acordo com Cappelli et al. (2001) os solos agrícolas estão sujeitos à compactação, devido a fenômenos naturais ou ao tráfego intensivo de máquinas e equipamentos agrícolas utilizados no processo produtivo. Esta compactação restringe a disponibilidade de água e de nutrientes para as culturas e oferece, ainda, resistência mecânica ao desenvolvimento radicular das plantas. Algumas consequências da compactação do solo são: baixo rendimento da cultura, acarretando em perdas econômicas; diminuição da capacidade de absorção de água no solo, causando escoamento superficial, erosão, arraste de fertilizantes e poluição de mananciais, entre outras.

Para Richart et al. (2005) o termo compactação do solo refere-se ao processo que descreve o decréscimo de volume de solos não saturados quando uma determinada pressão externa é aplicada, a qual pode ser causada pelo tráfego de máquinas agrícolas, equipamentos de transporte ou animais. Esta é a principal causa da compactação do solo, que foi intensificada pela modernização da agricultura, com o aumento do peso das máquinas e equipamentos e da intensidade de uso do solo. Esse processo não foi acompanhado por um aumento proporcional do tamanho e largura dos pneus, resultando em significativas alterações nas propriedades físicas do solo.

A principal causa da compactação dos solos agrícolas é o tráfego de tratores e máquinas, em sua maioria montados sobre rodados pneumáticos (BARBOSA et al. 2004). Esta compactação do solo atinge, muitas vezes, dimensões sérias, pois, ao causar restrições ao crescimento e desenvolvimento radiculares, acarreta uma série de problemas que afetam a produção das plantas. Os problemas de ordem agrônômica devido à compactação do solo são: aumento da resistência mecânica à penetração

radicular, redução da aeração, alteração do fluxo de água e calor, e da disponibilidade de água e nutrientes (SILVA, G et al., 2004).

Segundo Iaia et al. (2006) a caracterização da camada compactada e do comportamento do solo em relação às suas propriedades físicas, como densidade, porosidade, umidade e capacidade de retenção e infiltração da água e, principalmente, a localização da camada compactada, é de extrema importância para o planejamento das técnicas modernas de produção.

A maior parte dos danos causados pela compactação ocorre nas primeiras passadas das máquinas e implementos. À medida que o número de passadas no mesmo local aumenta, há aumento cada vez menos acentuado na compactação (Jakobsen e Greacen, 1985).

Cortez et al. (2008) enfatizam que o zoneamento da compactação do solo, por meio de mapas de espacialização da RMSP é um método eficiente para agregar informações sobre as condições físicas do solo em áreas de lavoura, direcionados para a AP.

Richart et al. (2005) relatam que a magnitude dos efeitos do manejo sobre as propriedades físicas do solo é determinada por condições climáticas, classe de solo, sistemas de rotação de culturas utilizados, tempo de uso dos diferentes sistemas de manejo e condição de umidade do solo em que são realizadas as operações de campo.

Para Furlani et al. (2008) a AP justifica-se pelo fato que a maioria dos produtores agrícolas considera o solo uniforme para cada área de cultivo. Porém, cada área pode ter consideráveis variações em seus atributos, principalmente a variabilidade espacial do tipo de solo e das características físicas, sendo necessário o estudo localizado a fim de identificar o manejo adequado.

De acordo com Toledo et al. (2006) a compactação do solo é um dos fatores que promovem a degradação do solo, pois influencia diretamente nos danos físicos, químicos e biológicos do solo, tendo como consequência a perda de produtividade do solo. Para os autores a variável RMSP indica um eficiente método para avaliar o grau de compactação do solo.

Para Roque et al. (2003), valores de RMSP até 4 MPa são toleráveis em solos não revolvidos anualmente, devido à permanência e continuidade de poros, atividade biológica mais ativa e maior estabilidade de agregados. Desta forma, os autores indicam que valores de RMSP abaixo de 4 MPa não devem provocar prejuízos acentuados ao crescimento das plantas de cana-de-açúcar.

Torres e Saraiva (1999) descrevem que valores em torno de 2,5 MPa são considerados baixos, ao passo que valores em torno de 3,5 a 6,5 MPa, podem causar problemas de impedimento mecânico para o desenvolvimento radicular das plantas.

Taylor et al. (1966), trabalhando quatro tipos de solos com estrutura deformada, consideram como resistência mecânica do solo impeditiva ao crescimento e desenvolvimento de raízes, o valor de 2,0 MPa.

2.3. Penetrômetros e Penetrógrafos

A preferência em utilizar penetrômetros para medir o estado de compactação está na praticidade e rapidez na obtenção dos resultados. Além disso, os penetrômetros medem a RMSP em pequenos incrementos de profundidade, sendo úteis para avaliar camadas de maior resistência em profundidade e os valores de resistência à penetração são positivamente correlacionados com a densidade do solo (SILVA, V et al., 2004).

Bianchini et al. (2002) relatam que a automação da coleta de dados de RMSP é a opção mais adequada para o levantamento da compactação de solos, no âmbito da AP. Segundo os autores o penetrógrafo automático com sistema dedicado de aquisição de dados, apresenta em relação aos de operação manual, maior capacidade e menor custo operacional, além de fornecer informações mais confiáveis, em função de um controle melhor da velocidade do cone.

Reinert et al. (2007) justificam o uso de penetrômetro de cone com taxa constante de penetração em relação ao penetrômetro portátil de acionamento manual, devido ao fato deste receber influência do operador nos resultados obtidos, particularmente pela dificuldade em manter-se uma taxa constante de operação.

Cappelli et al. (2001), relatam que o estado de compactação dos solos agrícolas, apesar de ser fortemente influenciado pelo teor de umidade do solo, pode ser associado, de forma simplificada, a um índice de resistência à penetração de um cone padronizado, denominado índice de cone (IC), obtido por um penetrômetro de cone. Os autores citando Perumpral (1987) afirmam que o uso de penetrômetros de cone está associado às seguintes aplicações: a) à engenharia civil, para obtenção de informações quanto à capacidade de suporte de estaca de fundações; b) à correlação entre o IC e os parâmetros de resistência do solo (coesão e ângulo de fricção); c) à predição da capacidade de tração e trafegabilidade de veículos fora-de-estrada; d) à estimativa do estado de compactação do solo; e) à determinação da resistência mecânica do solo ao crescimento radicular e emergência de plantas.

Duiker (2002) descreve a importância em se utilizar métodos práticos para se medir a compactação do solo. O autor justifica a importância de se estudar a RMSD devido ao impacto que esta pode causar na perda da produtividade agrícola. Os estudos realizados em fazendas da Pensilvânia – EUA indicaram que a compactação do solo promovido pela ação do homem, pode gerar queda na produtividade em até 10 % em culturas agrícolas. Outro fator importante é que solos compactados causam maior perda de solo por meio de erosão e por consequência a diminuição da infiltração da água provinda da chuva através do perfil do solo. Na análise da compactação, segundo o autor, deve-se atentar pela compactação superficial e também pela compactação transmitida ao longo do perfil do solo, ou seja, a camada de adensamento.

Herrick e Jones (2002) relatam que está aumentando cada vez mais o interesse dos pesquisadores em estudar a compactação do solo e seus efeitos na agricultura. Os autores citam a importância do uso de penetrômetros confiáveis para se medir a RMSD, por serem mais práticos e com custo menos elevado comparado a outros métodos.

Porém, é importante que estes penetrômetros estejam em conformidade com as normas estabelecidas pela ASAE S313.3 e também que o equipamento seja corretamente calibrado, para que os valores de RMSP possam ser confiáveis. Penetrômetros manuais não representam valores confiáveis por não exercerem uma penetração constante de 3 cm s^{-1} conforme a norma ASAE.

Rooney et al. (2000), descrevem que a compactação do solo é geralmente definida como um aumento da densidade natural do solo, a uma determinada profundidade. O aumento da densidade traduz em menos espaços porosos, tendo como consequências: menos água disponível para a planta; o transporte de água através do perfil do solo fica mais lento, e há uma nítida diminuição da capacidade da raiz de penetrar na zona compactada com o intuito de buscar nutrientes. Segundo os autores, existem procedimentos para minimizar a compactação solo, no qual estão expostas: confinar todo tráfego de máquinas em caminhos específicos no campo; reduzir o número de passadas do rodado no campo; usar equipamentos com menos carga por eixo do implemento; não exercer atividades que demandam tráfego de máquinas em áreas molhadas; instalar sistemas de drenagem em áreas propícias ao alagamento. Os autores ainda chamam a atenção para o impacto da umidade na leitura da RMSP, pois o fator umidade e outros componentes como textura do solo podem influenciar a correta interpretação desta informação. Desta forma os autores indicam algumas condições para a coleta de dados de RMSP: testes de campo devem ser realizados poucos dias após uma precipitação significativa, para que a água da chuva seja drenada através do perfil do solo. Os autores finalizam, relatando que o penetrômetro digital pode ser associado a um sistema de GPS para gerar mapas que ajudam o usuário a identificar as áreas que devem ser tratadas.

2.4. Análise estatística espacial

Ao analisar dados de atributos de solo mediante os métodos estatísticos clássicos são ignoradas as conseqüências da heterogeneidade espacial sobre a representatividade dos valores médios de amostras. No entanto, os métodos geoestatísticos (análise de semivariogramas e krigagem) estão sendo utilizados para analisar tanto a dependência espacial como para interpolar atributos de solo por meio da krigagem (SOUZA et al., 2006)

De acordo com Vieira (2000), alguns trabalhos demonstram que somente a informação dada pela variância seria insuficiente para explicar um fenômeno estudado. Para tal, seria necessário levar em consideração a distância entre as observações. A partir daí surge o conceito da geoestatística que leva em consideração a localização geográfica e a dependência espacial.

O termo geoestatística é empregado para caracterizar o estudo estatístico de um fenômeno natural com localização conhecida, caracterizando a distribuição no espaço de uma ou mais variáveis denominadas de “variáveis regionalizadas” (SIQUEIRA, 2006).

Para Souza et al. (2004) vários estudos relatam que a variabilidade das propriedades físicas do solo apresenta correlação ou dependência espacial. Portanto, a análise da variabilidade do solo por meio de técnicas da geoestatística, pode indicar alternativas de manejo, para reduzir os efeitos da variabilidade do solo sobre a produção das culturas.

Lima et al. (2008) citando o estudo realizado por Mercante et al. (2003) que consistiu na análise da variabilidade espacial da RMSP em áreas com diferentes manejos e profundidades, utilizando um penetrógrafo de haste, com ângulo de cone de 30°. Foram efetuados os cálculos das semivariâncias experimentais pelo estimador de Matheron com o ajuste pelos modelos teóricos. Neste estudo, os resultados indicaram

que a RMSP apresentou variabilidade espacial em relação aos diferentes manejos e profundidades do solo.

Iaia et al. (2006) relatam que as análises estatísticas clássicas que sempre trataram os solos como meio homogêneo, estão sendo substituídas por análises que levam em consideração as correlações entre observações vizinhas. Essas análises são possíveis graças aos grandes avanços computacionais de análise e modelagem que agora estão sendo aplicados na pesquisa de engenharia agrônômica. A teoria das variáveis locais, denominada geoestatística, é uma ferramenta que possibilita estudar a variabilidade espacial das propriedades do solo.

A análise geoestatística que permite detectar a existência da variabilidade e distribuição espacial das medidas estudadas constitui importante ferramenta na análise e descrição detalhada da variabilidade das propriedades do solo (CARVALHO et al. 2002; VIEIRA, 2000).

Conhecendo as coordenadas geográficas do ponto amostrado, podem-se analisar os dados espacialmente, possibilitando representar a área com maior detalhamento, segundo Vendrusculo (2001).

O nível de detalhamento é obtido por meio da distância entre pontos de amostragem e depende tanto da propriedade a ser analisada, quanto da escala de trabalho (tamanho da área amostrada) (GREGO; VIEIRA, 2005).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área experimental

3.1.1. Localização

Este trabalho foi realizado em áreas de produção mecanizada de cana-de-açúcar, pertencentes às Fazendas Santa Izabel e Bela Vista, ambas situadas no município de Jaboticabal, São Paulo, coordenadas 21°18' S e 48°10' W, altitude média 600 m.

Na Tabela 1 estão descritas as áreas avaliadas, cultivadas com cana-de-açúcar, com manejo totalmente mecanizado.

TABELA 1. Caracterização dos cortes.

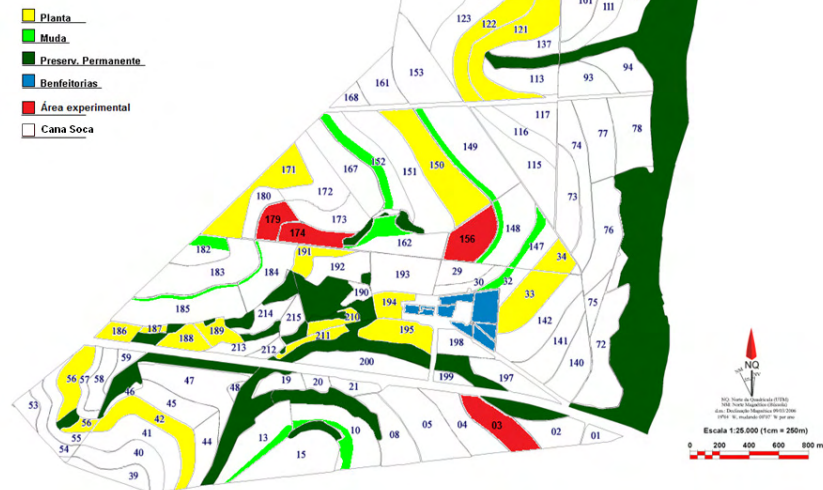
<i>Tratamento</i>	<i>Corte</i>	<i>Área (ha)</i>	<i>Variedade</i>	<i>Fazenda</i>
C1	1º	11,25	SP 90-1638	Bela Vista
C2	2º	8,87	SP 87-365	Santa Izabel
C3	3º	9,15	SP 90-1638	Santa Izabel
C4	4º	5,06	SP 87-365	Santa Izabel
C5	5º	6,13	SP 87-365	Santa Izabel

Nas Figuras 1 e 2 são mostradas as localizações geográficas dos talhões em estudo das fazendas Santa Izabel e Bela Vista, respectivamente.

Fazenda Santa Isabel

Localização: Jaboticabal - SP

SAFRA 2008/2009



Fonte: Grupo Santa Isabel (2008)

FIGURA 1. Fazenda Santa Isabel - Talhões utilizados na pesquisa: 03 (C2); 156 (C3); 174 (C5) e 179 (C4)

Fazenda Bela Vista

Localização: Jaboticabal - SP

SAFRA 2008/2009



Fonte: Grupo Santa Isabel (2008)

FIGURA 2. Fazenda Bela Vista - Talhão utilizado na pesquisa: 113 (C1)

3.1.2. Solo e Clima

O solo das áreas experimentais foi classificado como LATOSSOLO Vermelho eutroférico típico, textura muito argilosa, relevo suave (EMBRAPA, 1999). O clima da região é considerado como tropical com chuvas de verão (Aw) pela classificação de Köeppen-Geiger, com temperatura média do mês mais frio superior a 18 °C, estação invernal ausente e verão chuvoso.

3.2. Preparo e plantio

Baseado nas informações fornecidas pelo Grupo Santa Izabel, as operações de preparo do solo consistiram no uso dos implementos: subsolador de 5 hastes com ajuste nas profundidades de 45 a 50 cm e grade com 18 discos de 32 polegadas e grade com 28 discos de 28 polegadas. O sulco de plantio da muda ficou em média com 29 cm de profundidade.

3.3. Manejo

O manejo dos talhões, em cada época de corte, para todas as áreas experimentais, foi executado com operações mecanizadas consistindo de: colheita mecanizada com colhedora Case IH A7700, e dois conjuntos de tratores Case IH MXM150, tracionando transbordos Case Tracan VTX10000, e após a colheita foi realizada uma operação de cultivo com trator marca Massey Ferguson 630 trabalhando com cultivador de discos, e ainda, uma operação de aplicação de vinhaça e herbicida. A

Tabela 2 contém as informações relacionadas à descrição das máquinas utilizadas no sistema de colheita e cultivo.

TABELA 2. Descrição das máquinas utilizadas no sistema de colheita e cultivo.

<i>Máquina</i>	<i>Colhedora</i>	<i>Trator (colheita)</i>	<i>Transbordo</i>	<i>Trator (cultivo)</i>
Marca	Case IH	Case IH	Tracan	Massey Ferguson
Modelo	A 7700	MXM 150	VTX 10.000	MF630
Potência	246 kW (335 cv)	110 kW (149 cv)	- -	85 kW (115 cv)
Massa ¹	15000 kg	8000 kg	6500 kg	6700 kg
Carga ²	- -	- -	24 m ³ / 10 ton	- -
Rodado	Esteira metálica	Pneus diagonais	Pneus BPAF ³	Pneus diagonais
Dianteiro	- -	18.4-26R1	600/50-22.5	14.9-26R1
Traseiro	- -	24.5-32R1	- -	23.1-30R1
Bitola	1880 mm	2800 mm	3000 mm	1730 mm

¹em ordem de marcha, com lastro para tratores (valores aproximados); ²capacidade máxima de carga do transbordo; ³BPAF – baixa pressão e alta flutuação; - - inexistente. Fonte: fabricantes.

3.4. Equipamentos

A avaliação da RMSP foi realizada por meio da coleta de pontos na entrefileira (EF) e fileira (FIL) de plantio após a operação de colheita mecanizada. Para a coleta dos valores de RMSP do tratamento C1 utilizou-se o penetrômetro eletrônico DLG modelo PNT-2000/MOTOR (Figura 3), que segue a norma ASAE S313.3 (ASAE, 1996), possuindo memória com capacidade de armazenamento para 2048 amostras, amostrando-se dados de 1 em 1 cm até a profundidade de 50 cm, com velocidade de penetração da haste de 3 cm s⁻¹, célula de carga com capacidade de 1500 N para medição da força normal de penetração da haste, motor elétrico 12 Vcc com potência de 24 W para acionamento da haste e sensor indutivo para medição da profundidade de penetração, com precisão de 2 mm; porta de comunicação: NMEA-0183 pela interface serial RS-232C para computador e GPS; software PNTView para aquisição e

análise de dados de RMSP. Utilizou-se a haste com ponteira cônica, com área de 129 mm².



Fonte: DLG Automação Industrial Ltda (2008)

FIGURA 3. Penetrômetro eletrônico modelo PNT-2000/MOTOR.

Para a coleta dos pontos de RMSP dos cortes C2, C3, C4 e C5 utilizou-se o sistema Penetrômetro eletrônico DLG modelo PNT-2000/MOTOR padrão ASAE S313.3 acoplado ao quadriciclo (Figura 4) com a ponteira cônica de 73 mm². O quadriciclo utilizado para acoplar o penetrógrafo foi da marca Suzuki Motors, modelo LT-F160 QUADRUNNER, que possui massa seca de 162 kg, motor monocilindro com volume total de 158 cm³, quatro tempos, arrefecido a ar, OHC, movido à gasolina.



Fonte: Toledo et al. (2009)

FIGURA 4. Penetrômetro eletrônico PNT2000/Motor acoplado ao quadriciclo.

3.5. Determinação da malha amostral

Para o georreferenciamento dos pontos de RMSP utilizou-se um receptor GPS de navegação marca Garmin, modelo Etrex Vista com precisão máxima de 7 m, acoplado ao penetrômetro que registrou cada posição da amostra em coordenadas UTM.

Para a determinação da quantidade e do espaçamento entre pontos, tanto para a EF e FIL de plantio, levou-se em consideração a quantidade mínima de 30 pontos amostrais georreferenciado, conforme Silva et al. (2007) citando Wollenhaup et al. (1997), no qual relatam que não existe consenso na bibliografia a respeito do número mínimo de pares de pontos amostrais suficientes para a estimativa da semivariância experimental a cada “lag”, sendo recomendados 30 pares de pontos no mínimo. Para isto efetuou a operação matemática: tamanho da área experimental dividido pela quantidade de pontos. Desta forma obteve-se como resultado o *grid* amostral. A diferença entre a quantidade de pontos amostrados é justificado pelo fato que em algumas áreas experimentais optou-se por coletar pontos em escala menor.

Embora a precisão máxima do receptor de GPS seja de 7 m, devido ao fato dos pontos terem sido coletados seguindo a referência da entrefileira de plantio, notou-se que os pontos mantiveram o distanciamento entre si proposto na malha amostral de cada área experimental.

Na Tabela 3 encontram-se representadas a quantidade de pontos georreferenciados, coletados na EF e FIL de plantio, dentro dos *grids* amostrais estabelecidos de cada área experimental.

TABELA 3. Pontos coletados na EF e FIL de plantio.

<i>Áreas experimentais</i>	<i>Quantidade Pontos georreferenciados</i>		<i>Grid amostral (m)</i>
	<i>EF</i>	<i>FIL</i>	
1º Corte	60	59	40x40
2º Corte	51	51	35x35
3º Corte	34	34	50x50
4º Corte	39	39	40x40
5º Corte	49	49	35x35
TOTAL	465		-

Nas Figuras 5 e 6, extraídas do software PNTView®, são representadas as distribuições georreferenciadas em coordenadas UTM das amostras coletadas em cada corte na EF e FIL de plantio respectivamente.

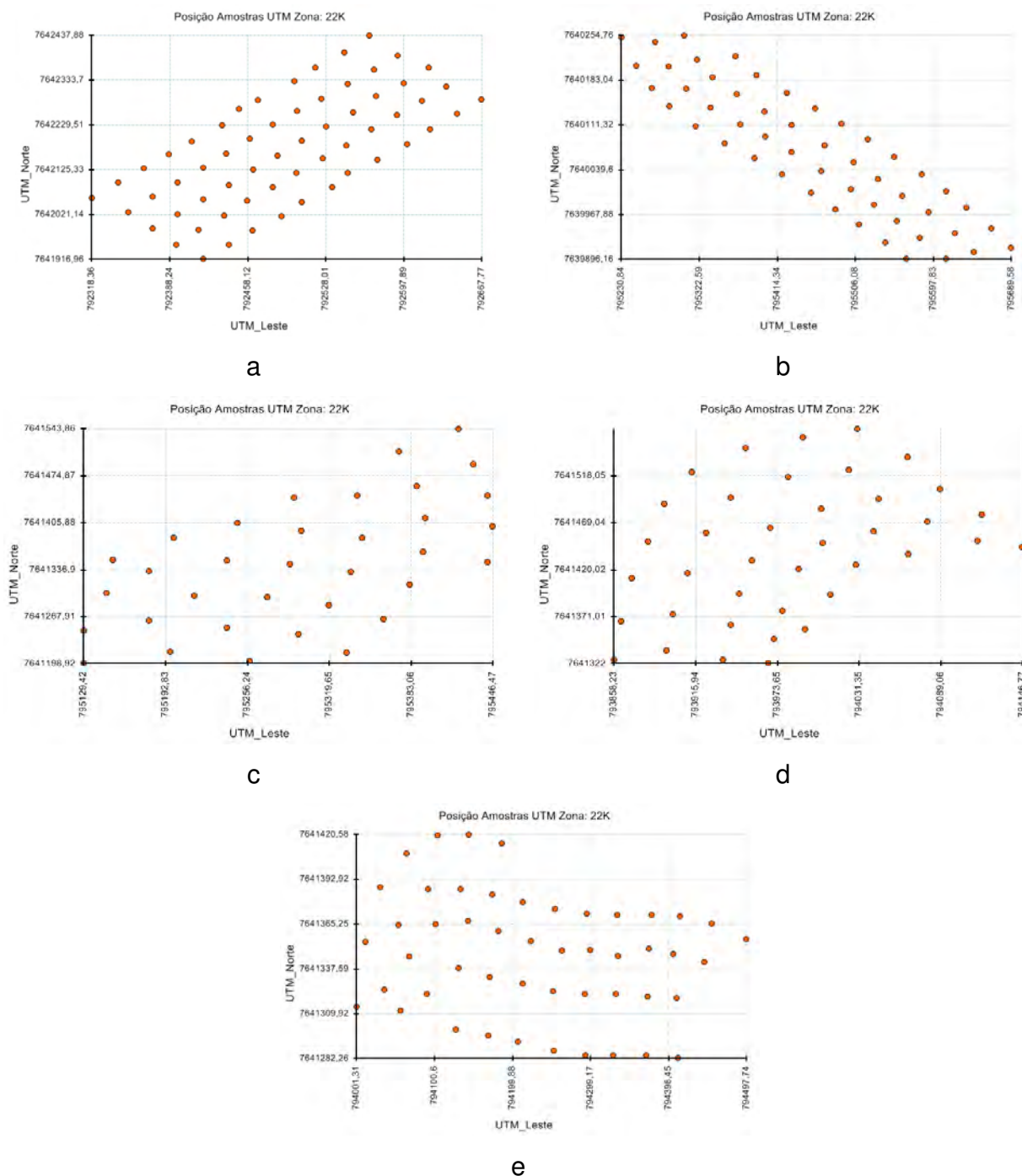


FIGURA 5. Distribuição dos pontos georreferenciados da EF coletados seguindo o espaçamento definido para os cortes: C1 (a); C2 (b); C3 (c); C4 (d) e C5 (e).

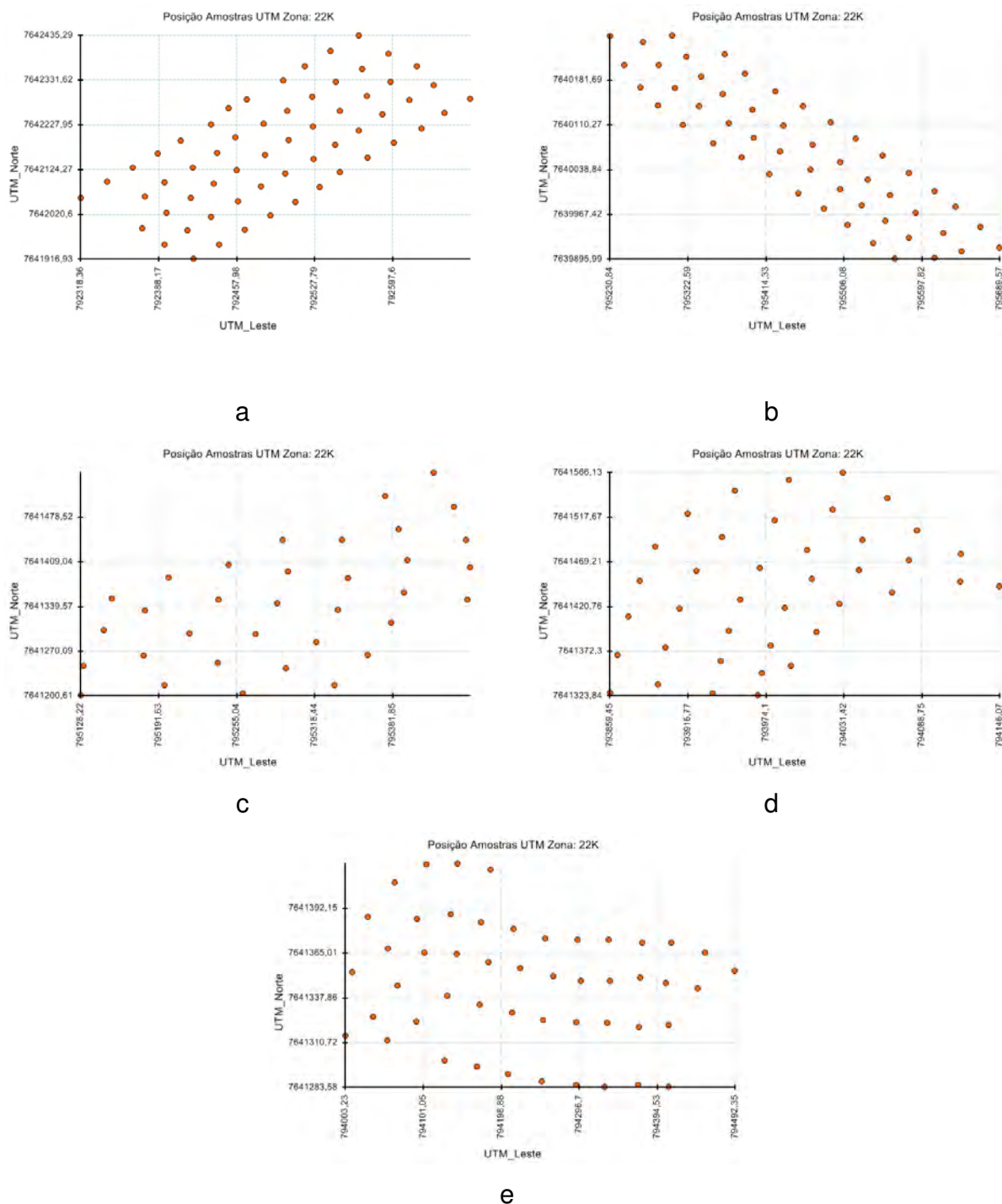


FIGURA 6. Distribuição dos pontos georreferenciados da FIL coletados seguindo o espaçamento definido para os cortes: C1 (a); C2 (b); C3 (c); C4 (d) e C5 (e)

3.6. Teor de água no solo

Para a avaliação do teor médio de água, utilizou-se o método gravimétrico padrão, descrito em Embrapa (1979), sendo coletadas amostras de solo em pontos aleatórios dentro das áreas experimentais, com auxílio de um trado manual e cápsulas de alumínio, nas camadas de 01-10, 11-20, 21-30, 31-40 e 41-50 cm. A quantidade de amostras retiradas para as áreas experimentais C1, C2, C3, C4 e C5 foram, respectivamente, 10, 4, 4, 4 e 5.

Utilizou-se o software aplicativo Minitab® 14 (Minitab, 2004) para a execução da análise de variância, no qual as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5%.

3.7. Análise estatística descritiva dos dados de RMSP

A estatística descritiva foi utilizada para analisar os principais parâmetros estatísticos (média, mediana, amplitude, desvio padrão, coeficientes de variação, assimetria e curtose).

Também se aplicou o teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov para a obtenção do desvio máximo em relação à distribuição normal. A determinação da estatística descritiva e o teste de normalidade foram executados por meio do software estatístico Minitab® 14 (MINITAB, 2004).

3.8. Análise estatística espacial dos dados de RMSP

Para análise da variabilidade espacial utilizou-se a geoestatística (Vieira, 2000), que consistiu no ajuste dos semivariogramas para os intervalos de profundidade nos cortes em estudo. Após o cálculo do semivariograma experimental, foi realizado um

ajuste sobre a nuvem de pontos, obtendo-se um semivariograma modelado. Neste estudo, considerou-se um comportamento isotrópico sendo avaliado para 0º na direção das abscissas.

Definido o melhor semivariograma aplicou-se a técnica de krigagem para a geração dos mapas de espacialização dos valores médios de RMSD. De acordo com Souza et al. (2004) a análise da dependência espacial é baseada na suposição de que medições separadas por pequenas distâncias são mais semelhantes umas a outras, que aquelas separadas por distâncias maiores.

De acordo com Robertson (2008) o semivariograma é definido como o gráfico da função semivariância, dada pela equação 1:

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

em que,

$N(h)$ - o número de pares experimentais de observações; e

$Z(x_i)$, $Z(x_i + h)$ - valor de atributos medidos na posição x_i e $x_i + h$, separados por um vetor h (distância entre amostras).

O semivariograma forneceu estimativas dos parâmetros: efeito pepita (C_0), patamar ($C_0 + C$) e alcance (A). O efeito pepita (C_0) é o parâmetro do semivariograma que indica a variabilidade não explicada dos modelos, considerando a distância de amostragem utilizada. Quando o semivariograma for constante para todos os valores de h , o efeito pepita (C_0) será igual o valor do patamar, caracterizando assim o efeito pepita puro, o que significa ausência de dependência espacial entre as amostras.

Foram utilizados os modelos teóricos de semivariograma, esférico, gaussiano, exponencial e linear, sendo ajustados com o auxílio do software GS+ (ROBERTSON, 2008).

Landim (1998) definiu o avaliador da dependência espacial (ADE), como um parâmetro de comparação do efeito pepita, dado pela equação (2).

$$ADE = \frac{C}{C + C_0} \times 100 \quad (2)$$

em que,

C – variância estrutural;

C + C₀ – variância do patamar; e

C₀ – Efeito pepita.

Segundo Landim (1998), ADE < 25% indica dependência espacial fraca, 25% < ADE < 75% indica dependência espacial moderada e ADE > 75% indica dependência espacial forte.

Para Toledo (2008) a SQR (Soma de quadrados de resíduos) demonstra uma medida exata de quão bem o modelo ajusta o semivariograma aos dados. Quanto menor o valor, melhor ajustado está o modelo. Quando o software GS+ auto-ajusta o modelo, usa a SQR para selecionar os parâmetros (efeito pepita, patamar e alcance) para cada um dos modelos de semivariograma (linear, esférico, exponencial ou gaussiano), determinando a melhor combinação entre esses parâmetros a fim de minimizar a SQR para qualquer modelo selecionado.

Diferente dos métodos convencionais de interpolação, a krigagem esta fundamentada na teoria das variáveis regionalizadas, baseada na hipótese chamada de estacionaridade de 2ª ordem, que de acordo com Camargo (1998) são definidas como: 1) patamar claro e definido, ou seja, não há tendência na região e; 2) a variância das diferenças entre duas amostras depende somente da distância *h* entre elas.

Foram utilizados os critérios de menor SQR e o maior R² (coeficiente de determinação) para a determinação do melhor modelo de semivariograma, além do teste de Validação Cruzada (Robertson, 2008), que consiste em retirar informações do conjunto original de dados e estimando-os a partir do restante dos pontos. Para este

método utilizou-se o melhor coeficiente angular. Após a determinação dos modelos de semivariograma efetuou-se a construção de mapas de isolinhas, utilizando a krigagem como o método de interpolação.

Conforme citam Grego e Vieira (2005), a construção de mapas utilizando-se a krigagem é importante para a verificação e interpretação da variabilidade espacial, pois, com as informações visuais fornecidas pelos mapas, pode-se inferir para melhorias nas propriedades analisadas.

3.9. Escala de valores de RMSP

A resistência mecânica do solo à penetração tem sido utilizada como parâmetro importante na determinação das condições físicas para o crescimento das plantas por meio da sua relação com o crescimento das raízes.

Seguindo as indicações dos autores Torres e Saraiva (1999), Roque et al. (2003) e Taylor et al. (1966) foi criada uma escala para classificar os valores de RMSP obtidos por meio da krigagem, em que os valores entre 0 a 2 MPa foram considerados baixos, sem impeditivos ao crescimento da planta; acima de 2 a 4 MPa moderados, ou seja, correspondem à faixa em que começa haver impeditivos ao crescimento da planta; valores acima de 4 a 6 MPa receberam a classificação alta, ou seja, indicam a faixa de RMSP que oferece impedimento ao crescimento radicular; e por fim a faixa com valores de RMSP acima de 6 MPa, foi classificada como muito alta.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Histórico de produtividade das áreas experimentais

A Tabela 4 contém os dados de produtividade de safras anteriores de cada área em estudo. Estes valores foram fornecidos pelo gerente agrícola e foram estimados conforme metodologia adotada nas fazendas. Observa-se que ocorreu diminuição na produtividade de um ano para o próximo em todos os tratamentos, com exceção de C5 em que a produtividade praticamente não variou a partir do 3º ano em diante. Fato este pode estar relacionado a outros fatores, como por exemplo, a temperatura e a precipitação.

TABELA 4. Histórico de produtividade dos cortes.

<i>Tratamentos</i>	<i>Produtividade (Toneladas/hectare)</i>				
	<i>Épocas</i>				
	<i>1º ano</i>	<i>2º ano</i>	<i>3º ano</i>	<i>4º ano</i>	<i>5º ano</i>
C1	142				
C2	138	128			
C3	130	97	92		
C4	122	121	84	76	
C5	110	91	76	75	76

Fonte: Fazenda Santa Izabel.

4.2. Avaliação do teor médio de água no solo

Estão inseridos na Tabela 5 os teores de água do solo nas profundidades de 1-10, 11-20, 21-30, 31-40, 41-50 cm.

TABELA 5. Teor de água no solo

<i>Profundidade (cm)</i>	<i>Média do Teor de Água (%)</i>				
	<i>Primeiro Corte (C1)</i>	<i>Segundo Corte (C2)</i>	<i>Terceiro Corte (C3)</i>	<i>Quarto Corte (C4)</i>	<i>Quinto Corte (C5)</i>
1-10	20,65 Aa	19,86 Aa	19,90 Aa	19,20 Aa	21,27 Aa
11-20	20,32 Aa	19,93 Aa	19,88 Aa	20,04 Aa	20,70 Aa
21-30	20,35 Aa	20,69 Aa	20,13 Aa	19,83 Aa	21,34 Aa
31-40	20,52 Aa	20,80 Aa	20,38 Aa	19,81 Aa	21,38 Aa
41-50	20,76 Aa	20,68 Aa	20,08 Aa	19,57 Aa	21,22 Aa

Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Observa-se que não foi constatada diferença estatística entre os valores para as camadas e tampouco entre as áreas experimentais. Desta forma, assume-se que os valores de teor de água de todas as camadas e cortes apresentaram valores semelhantes e que os dados obtidos pela penetrômetria, efetivamente, indicaram a camada compactada no solo.

4.3. Resistência Mecânica do Solo à Penetração na Entrefileira de Plantio

4.3.1. Análise estatística descritiva

Na Tabela 6 é apresentada a estatística descritiva dos valores de resistência mecânica do solo à penetração (RMSP) na entrefileira (EF) de plantio nas profundidades amostradas e áreas experimentais em estudo.

TABELA 6. Estatística descritiva de RMSP na EF.

Resistência Mecânica do Solo a Penetração							
Profundidade (cm)	Média MPa	Mediana MPa	Máximo MPa	Coeficientes			1d
				Variação %	Assimetria	Curtose	
(C1)							
01-10	1,58	1,61	4,45	54,43	0,36	0,25	0,04
11-20	2,48	2,39	6,03	28,39	1,45	4,39	0,07
21-30	2,54	2,44	6,23	29,97	1,65	4,80	0,08
31-40	2,49	2,40	5,84	28,28	1,29	2,50	0,08
41-50	2,48	2,37	5,38	25,74	1,54	4,17	0,14
(C2)							
01-10	2,58	2,75	11,00	68,76	0,77	1,93	0,07
11-20	3,92	3,71	6,85	23,72	0,66	0,23	0,10
21-30	3,70	3,59	6,77	23,30	0,69	0,65	0,07
31-40	4,03	3,75	8,07	28,59	1,12	1,24	0,10
41-50	4,03	3,61	11,80	36,18	1,88	5,08	0,13
(C3)							
01-10	2,83	2,64	10,63	76,61	0,92	1,03	0,10
11-20	4,29	4,11	9,29	27,54	1,65	3,70	0,14
21-30	4,39	4,14	7,96	28,42	0,69	-0,08	0,10
31-40	4,88	4,67	7,82	25,58	0,54	-0,64	0,08
41-50	5,46	5,32	8,65	26,30	0,37	-0,92	0,10
(C4)							
01-10	2,50	2,47	7,47	74,18	0,33	-0,94	0,11
11-20	4,18	4,10	7,20	23,06	0,68	0,52	0,06
21-30	4,02	3,91	7,44	23,22	1,12	1,65	0,10
31-40	4,09	3,87	8,23	29,68	1,03	0,91	0,10
41-50	4,51	4,03	9,73	35,97	1,25	1,03	0,14
(C5)							
01-10	2,77	2,86	7,37	62,75	0,13	-0,94	0,08
11-20	4,18	4,17	9,18	20,95	0,91	4,04	0,06
21-30	4,26	4,07	8,93	23,97	1,22	2,18	0,10
31-40	4,22	3,94	17,29	38,02	3,90	25,34	0,15
41-50	4,34	4,10	8,93	28,22	1,09	1,73	0,08

¹d: teste de normalidade; ^{ns} não significativo a 5% de probabilidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. C_i = i-ésimo corte da cana-de-açúcar (i = 1 a 5).

Nota-se que a camada superficial de todos os cortes possui valores de coeficiente de variação (CV%), superiores a 30%, no qual são classificados conforme Pimentel-Gomes (2000) como muito alto. Coeficiente de variação elevado (41,08%), para a resistência mecânica do solo à penetração na camada superficial (0-10 cm), foi encontrado por Castro (1995) em Latossolo Roxo, para cultura anual. Fato semelhante também observado por Ribon et al. (2008) no estudo da RMSP em latossolos, no qual foi verificado CV% na camada superficial de 42,85%. Também foram classificados como muito alto os valores de CV% das camadas 41-50 de C2, 41-50 de C4 e 31-40 cm de C5. Os demais valores de CV% foram classificados como alto ($20\% < CV < 30\%$), indicando alta variabilidade dos dados, concordando com os resultados obtidos por Souza et al. (2006), quando analisou dados de RMSP para latossolos.

Todos os intervalos de profundidade avaliados nas áreas experimentais, quanto a RMSP, apresentaram valor d significativos a 5% de probabilidade pelo teste Kolmogorov-Smirnov, confirmando assim o comportamento dos valores da assimetria e curtose, que não estão próximos a zero, indicando que os dados não apresentam normalidade. De qualquer forma, de acordo com Corá e Beraldo (2006) a normalidade não é uma exigência da geoestatística.

Na Figura 7 encontram-se representadas as curvas de valores médios de RMSP por profundidade, extraídos da Tabela 6, nos cortes 1 a 5.

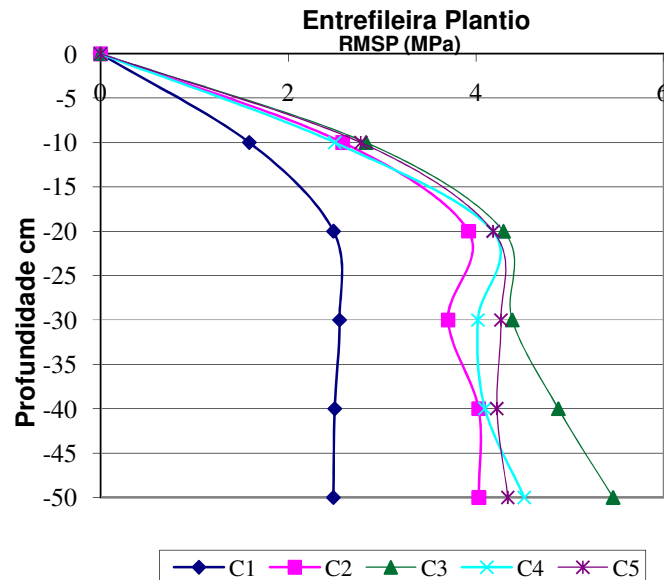


FIGURA 7. Curvas de valores médios de RMSP de EF nos cortes 1 a 5.

Observa-se que as curvas de 2º a 5º cortes distanciaram-se consideravelmente da curva de 1º corte, ao passo que as curvas de 2º a 5º cortes não se distanciaram muito entre si. Isto é consequência do preparo do solo que ocorreu no primeiro ano, consistindo das operações de subsolagem a 50 cm de profundidade e de gradagem, não havendo muito trânsito de máquinas, no qual é percebido nos demais cortes subsequentes. Fato similar também foi observado por Jakobsen e Greacen (1985), no qual descrevem que a maior parte dos danos causados à estrutura do solo e consequentemente as plantas, pela compactação ocorre nas primeiras passadas das máquinas e implementos. À medida que o número de passadas no mesmo local aumenta, há aumento cada vez menos acentuado na compactação.

Percebe-se também, que a camada superficial de todos os cortes contém valores de RMSP (Tabela 6) menores que os demais. Isto pode ser caracterizado devido ao uso do cultivador, que de acordo com os dados fornecidos pelos responsáveis técnicos da fazenda foi efetuado a uma profundidade de 10 e 15 cm.

4.3.2. Análise estatística espacial

A RMSP dos cortes (Tabela 7) apresentou dependência espacial em todas as profundidades estudadas expressa por meio de modelos de semivariograma, apresentados nas Figuras 8 a 12.

TABELA 7. Geoestatística de RMSP na EF.

<i>Resistência Mecânica do Solo a Penetração</i>								
<i>Prof (cm)</i>	<i>Modelo</i>	<i>Efeito Pepita(C_0)</i>	<i>Patamar (C_0+C)</i>	<i>Alcance (a) m</i>	<i>¹ADE</i>	<i>²SQR</i>	<i>³R2</i>	<i>VC</i>
<i>(C1)</i>								
1-10	Exponencial	0,004	0,160	61,80	97,10	0,001	0,109	0,67
11-20	Gaussiano	0,001	0,453	65,30	99,80	0,030	0,774	0,94
21-30	Gaussiano	0,001	0,375	69,97	99,97	0,031	0,783	0,97
31-40	Gaussiano	0,001	0,366	77,60	99,70	0,014	0,888	0,71
41-50	Exponencial	0,035	0,269	66,60	86,80	0,004	0,455	0,97
<i>(C2)</i>								
1-10	Gaussiano	0,007	0,537	68,76	99,80	0,088	0,594	0,52
11-20	Exponencial	0,054	0,630	49,80	91,40	0,023	0,155	0,86
21-30	Esférico	0,001	0,573	52,10	99,80	0,019	0,467	0,85
31-40	Esférico	0,033	1,257	35,10	97,40	0,069	0,100	0,35
41-50	Esférico	0,037	1,176	52,50	96,90	0,082	0,200	0,54
<i>(C3)</i>								
1-10	Exponencial	0,438	1,712	136,50	74,40	0,032	0,738	0,81
11-20	Gaussiano	0,001	0,620	55,43	99,80	0,043	0,027	0,68
21-30	Exponencial	0,011	1,043	100,50	98,90	0,015	0,784	0,70
31-40	Gaussiano	0,001	0,960	47,63	99,99	0,033	0,560	0,83
41-50	Gaussiano	0,029	1,466	85,80	98,00	0,010	0,401	0,82
<i>(C4)</i>								
1-10	Gaussiano	0,001	0,783	63,22	99,90	0,042	0,851	0,67
11-20	Esférico	0,291	0,811	69,80	64,10	0,063	0,404	0,47
21-30	Esférico	0,001	0,719	48,80	99,99	0,144	0,201	0,04
31-40	Gaussiano	0,001	1,122	56,46	99,90	0,427	0,658	0,11
41-50	Gaussiano	0,001	1,972	62,70	99,90	1,110	0,704	0,21
<i>(C5)</i>								
1-10	Gaussiano	0,001	0,842	59,93	99,99	0,179	0,771	0,67
11-20	Exponencial	0,082	0,601	35,60	86,40	0,123	0,026	0,64
21-30	Gaussiano	0,001	0,874	59,58	99,90	0,182	0,703	0,57
31-40	Gaussiano	0,001	0,824	53,69	99,90	0,098	0,773	0,36
41-50	Esférico	0,001	1,361	57,60	99,90	0,200	0,676	0,33

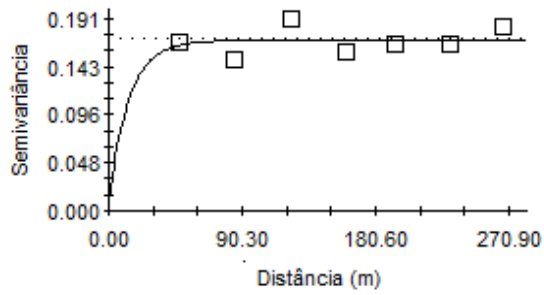
¹ ADE – Avaliador da Dependência Espacial; ² SQR – Soma dos quadrados dos resíduos; ³ R2 – coeficientes de determinação; ⁴ VC – Validação cruzada (coeficiente angular). C_i = i-ésimo corte da cana-de-açúcar (i = 1 a 5).

Os dados de RMSP ajustaram-se ao modelo gaussiano nas profundidades 11-20, 21-30, 31-40 de C1; 1-10 de C2; 11-20, 31-40, 41-50 de C3; 1-10, 31-40, 41-50 de C4; 1-10, 21-30, 31-40 de C5, exponencial nas profundidades 1-10, 41-50 de C1; 11-20 de C2; 1-10, 21-30 de C3; 11-20 de C5 e esférico para as demais camadas.

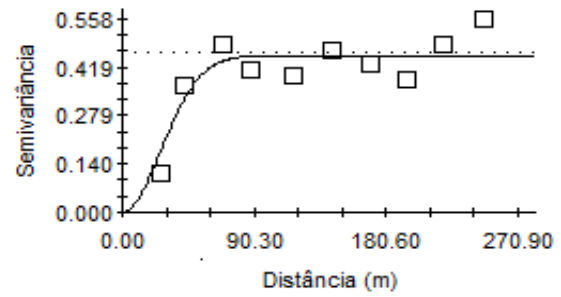
A análise do parâmetro avaliador da dependência espacial (ADE) indicou forte dependência espacial ($ADE > 75\%$) para todas as profundidades estudadas nos cortes, com exceção das camadas 1-10 de C3 e 11-20 de C4 que apresentaram ADE classificadas como moderadas ($25\% < ADE < 75\%$) que, no entanto, encontram-se com valores de ADE próximos de 75%.

Segundo Souza et al. (2004), o alcance estabelece limite de dependência espacial entre as amostras, isto é, para distâncias iguais ou menores que o alcance, pode-se dizer que os valores vizinhos de uma variável estão espacialmente correlacionados. Percebe-se que os valores de alcance são variados entre as profundidades e entre as áreas de estudo. O terceiro corte (C3) apresentou camadas de profundidade de maior alcance: 1-10 cm com alcance de 136,5 m e a camada 21-30 cm com alcance de 100,50 m, ambos ajustados com modelo de semivariograma exponencial. O menor valor de alcance (35,60 m) está localizado na camada 11-20 de C5.

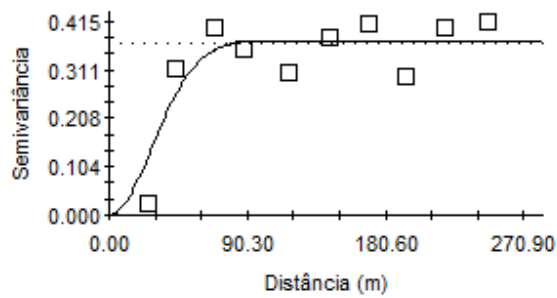
Observa-se que todos os valores de alcance obtidos foram maiores que o valor de espaçamento entre as amostragens, indicando que as amostras estão correlacionadas umas a outras, o que permite que se façam interpolações (VIEIRA, 2000).



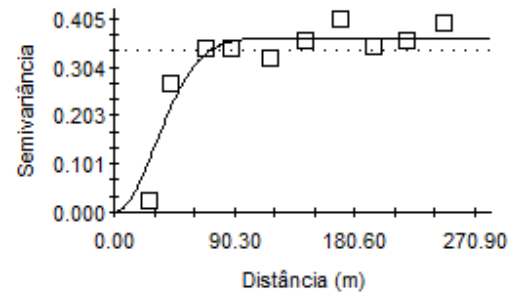
(a)



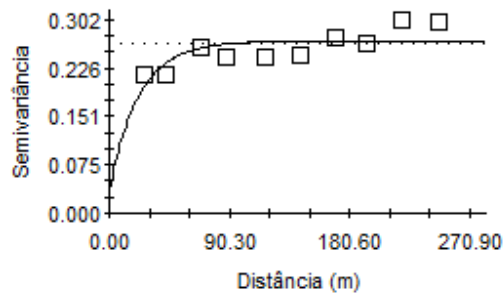
(b)



(c)



(d)



(e)

FIGURA 8. Semivariogramas ajustados do 1º corte (C1) de EF para as profundidades 01-10 (a), 11-20 (b), 21-30 (c), 31-40 (d) e 41-50 cm (e).

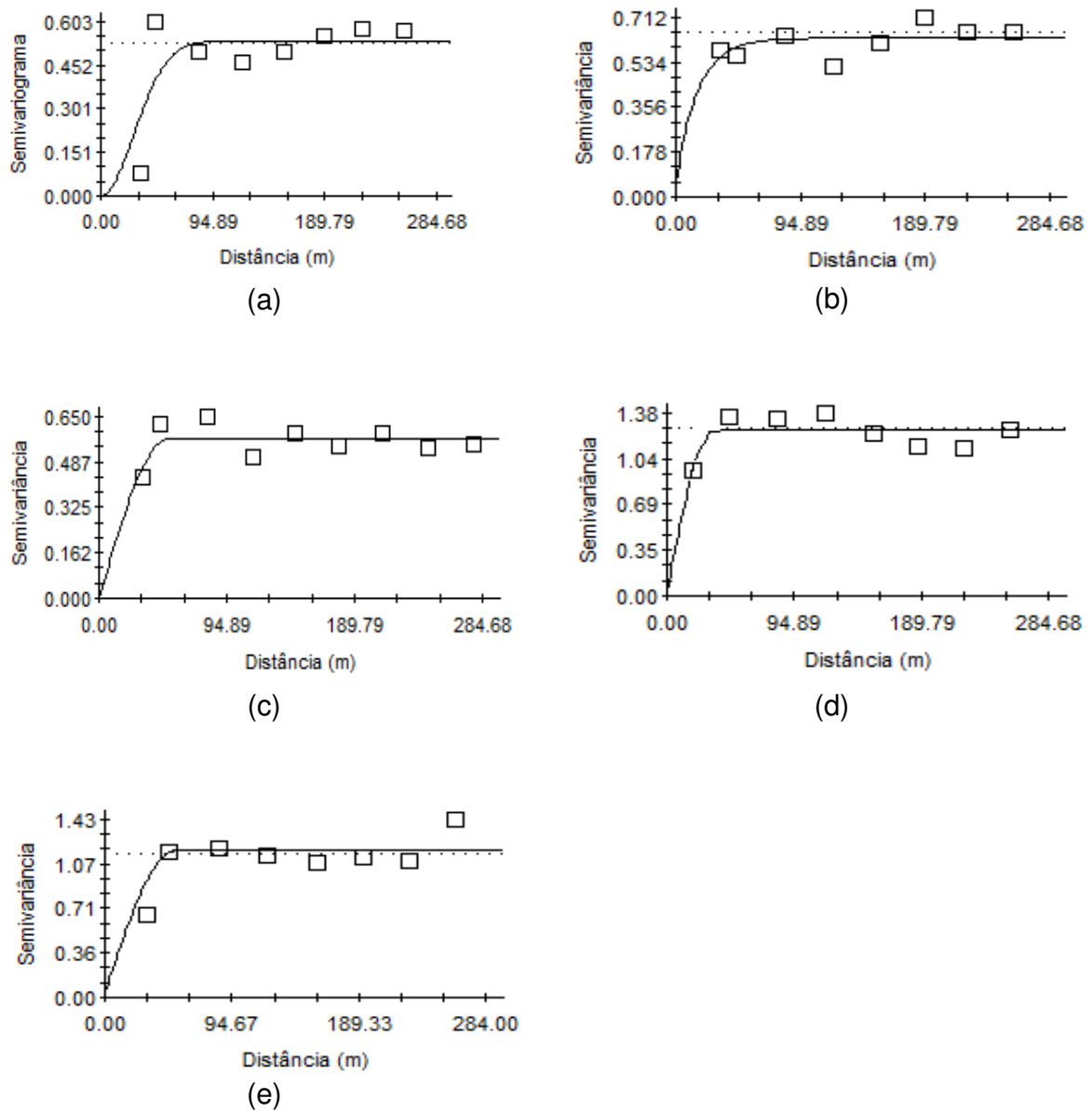


FIGURA 9. Semivariogramas ajustados do 2º corte (C2) de EF para as profundidades 01-10 (a), 11-20 (b), 21-30 (c), 31-40 (d) e 41-50 cm (e).

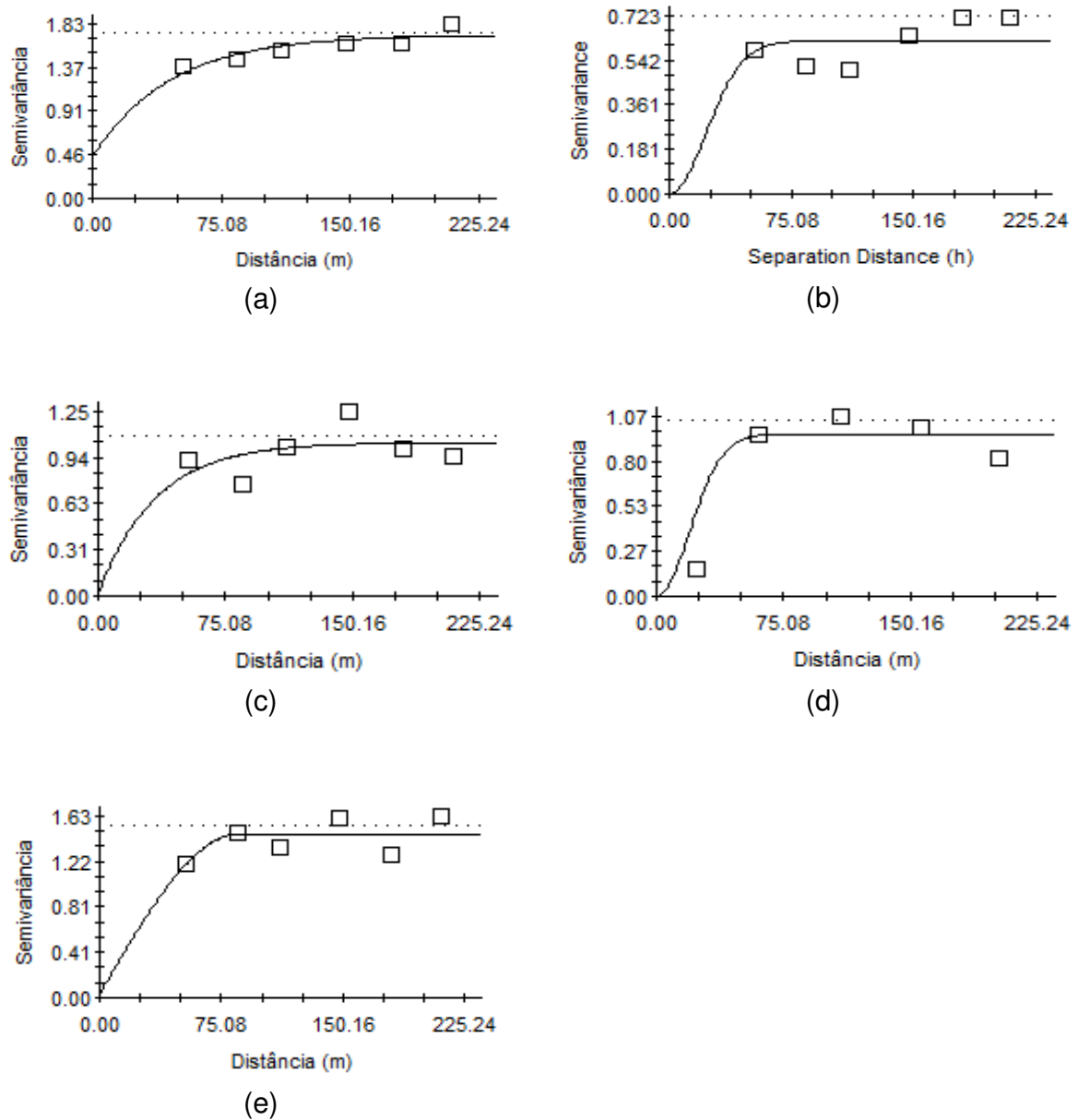
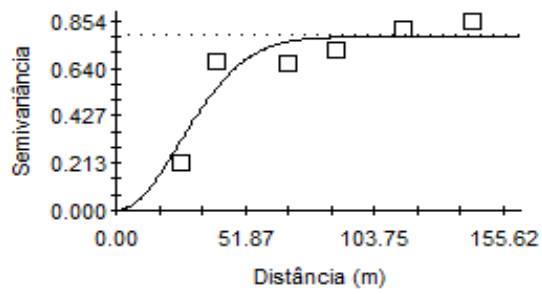
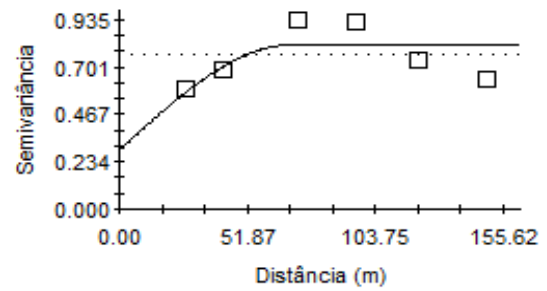


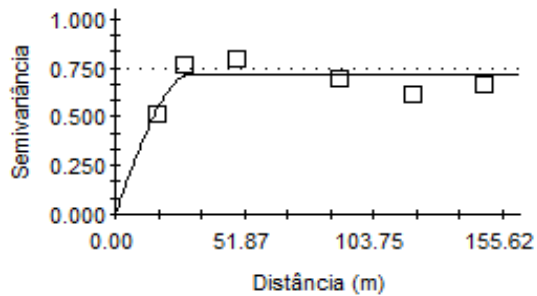
FIGURA 10. Semivariogramas ajustados do 3º corte (C3) de EF para as profundidades 01-10 (a), 11-20 (b), 21-30 (c), 31-40 (d) e 41-50 cm (e).



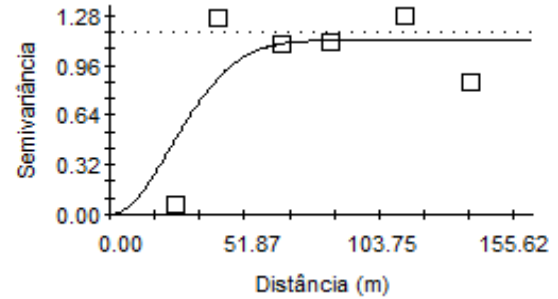
(a)



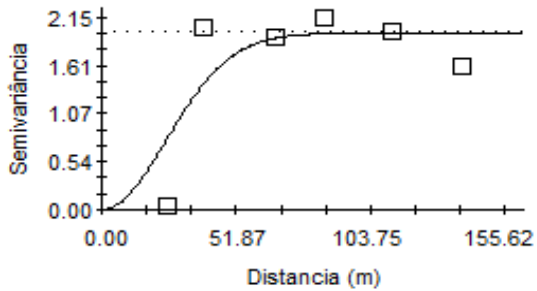
(b)



(c)

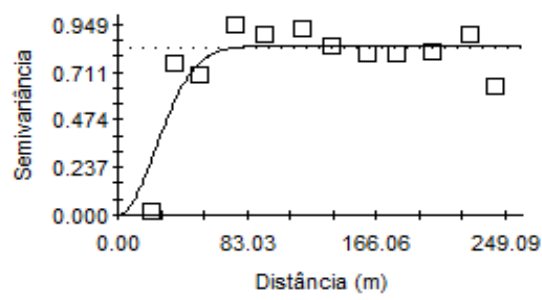


(d)

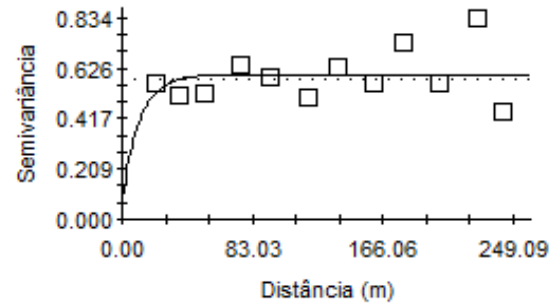


(e)

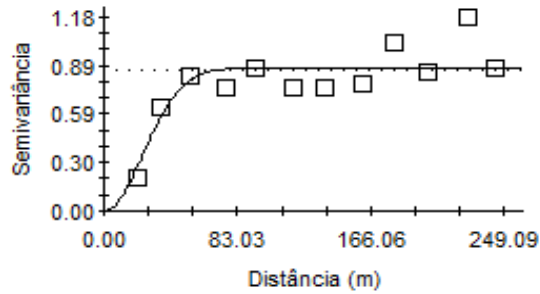
FIGURA 11. Semivariogramas ajustados do 4º corte (C4) de EF para as profundidades 01-10 (a), 11-20 (b), 21-30 (c), 31-40 (d) e 41-50 cm (e).



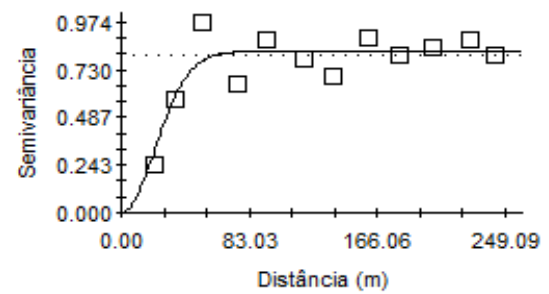
(a)



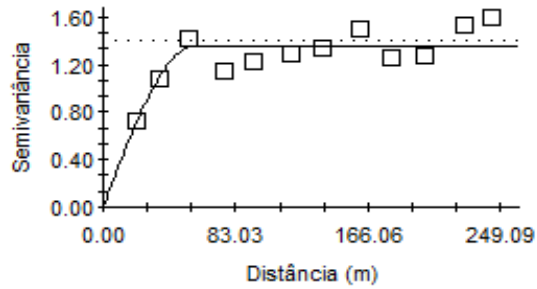
(b)



(c)



(d)



(e)

FIGURA 12. Semivariogramas ajustados do 5º corte (C5) de EF para as profundidades 01-10 (a), 11-20 (b), 21-30 (c), 31-40 (d) e 41-50 cm (e).

Nota-se que os valores do patamar estão próximo aos valores da variância dos dados, que está representada nos gráficos de semivariância como a linha pontilhada. Segundo Vieira (2000), este fato demonstra que os dados provavelmente poderão ser estacionários de ordem 2, porque têm um patamar claro e definido, ou seja, constante, e com toda certeza, estarão sob a hipótese intrínseca.

Os parâmetros dos modelos dos semivariogramas ajustados foram utilizados no método de interpolação por meio da krigagem, que consiste em estimar valores em locais não amostrados, gerando os mapas de isolinhas bidimensionais para o detalhamento espacial da RMSP, o que permitiu visualizar áreas com mesma variabilidade espacial. Estes mapas de isolinhas apresentados na Figura 13 foram gerados utilizando-se o software Surfer[®] 8.0 (SURFER, 2007).

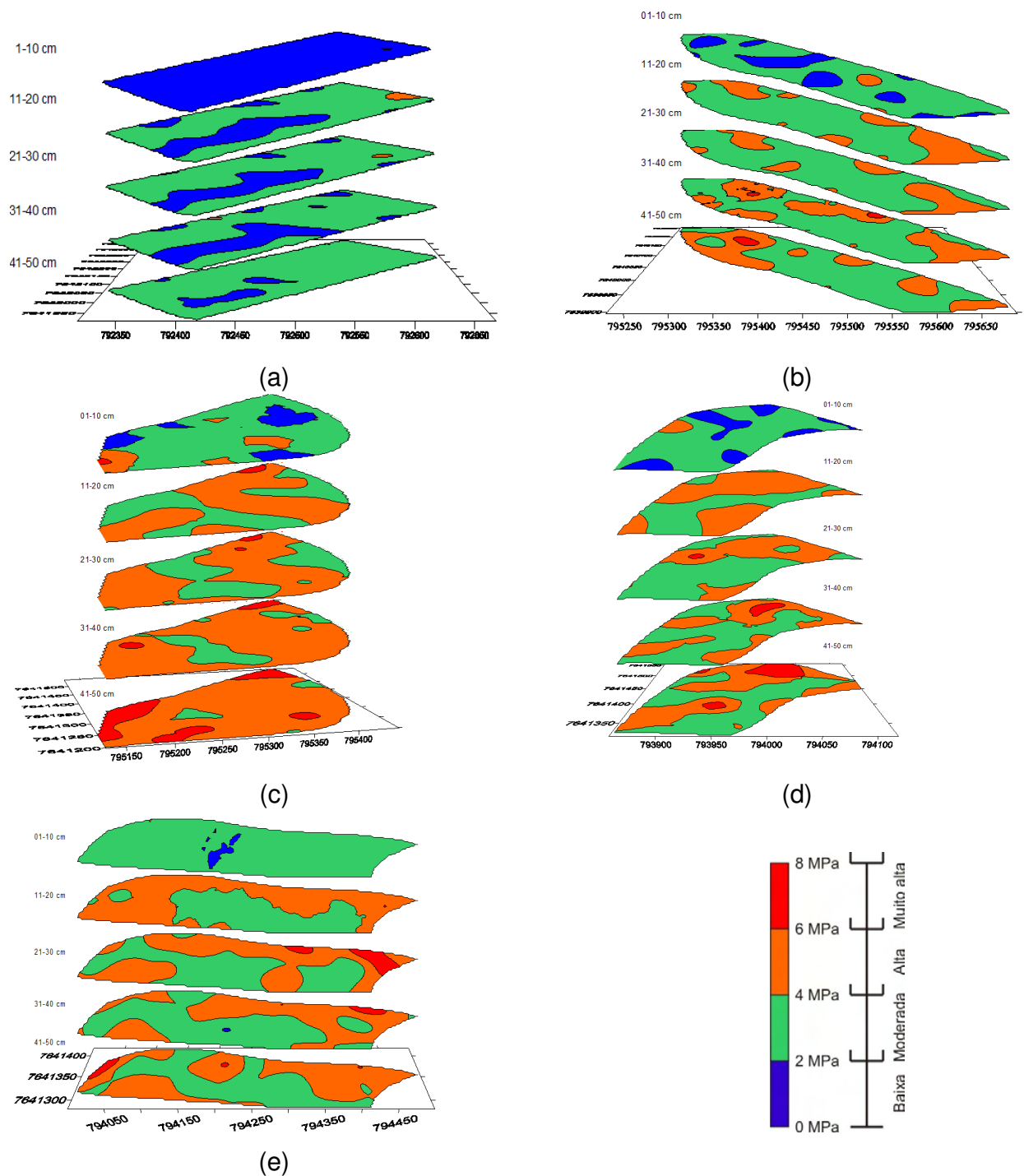


FIGURA 13. Mapas de Espacialização de RMSP média para camadas 01-10, 11-20, 21-30, 31-40 e 41-50 cm dos cortes: 1º corte (a), 2º corte (b), 3º corte (c), 4º corte (d), 5º corte (e).

Na Tabela 8 são apresentados os valores percentuais da área total dos cortes inseridas na faixa de valores de RMSP, definidas como baixo (0 a 2 MPa), médio (> 2 a 4 MPa), alto (>4 a 6 MPa) e muito alto (acima de 6 MPa) segundo a escala adotada baseada nas indicações de Torres e Saraiva (1999), Roque et al. (2003) e Taylor et al. (1966). Para a determinação do percentual de áreas que estão inseridas entre faixas de valores de RMSP visualizadas nos mapas de isolinhas, utilizou-se a função Volume do software aplicativo Surfer[®] 8.0 (SURFER, 2007).

TABELA 8. Distribuição de áreas nos intervalos de RMSP na EF.

Prof (cm)	Distribuição de áreas na EF				
	Intervalos (MPa)				
	0-2	2-4	4-6	6-8	>4MPa
<i>C1(%)</i>					
01-10	99,87	0,13	0,00	0,00	0,00
11-20	21,30	76,42	2,27	0,00	2,27
21-30	19,48	79,88	0,64	0,00	0,64
31-40	22,11	77,62	0,27	0,00	0,27
41-50	6,04	93,96	0,00	0,00	0,00
<i>C2(%)</i>					
01-10	24,42	73,48	2,10	0,00	2,10
11-20	0,00	71,59	28,41	0,00	28,41
21-30	0,00	75,42	24,58	0,00	24,58
31-40	0,00	58,67	39,83	1,50	41,33
41-50	0,00	60,74	36,99	2,26	39,25
<i>C3(%)</i>					
01-10	14,72	76,32	8,59	0,37	8,96
11-20	0,00	39,35	59,09	1,55	60,64
21-30	0,00	34,31	64,34	1,35	65,69
31-40	0,00	16,88	79,70	3,41	83,11
41-50	0,00	4,38	79,46	16,16	95,62
<i>C4(%)</i>					
01-10	23,20	72,93	3,87	0,00	3,87
11-20	0,00	35,82	64,18	0,00	64,18
21-30	0,00	52,85	46,39	0,76	47,15
31-40	0,00	51,90	43,65	4,45	48,10
41-50	0,00	42,18	46,15	9,66	55,81
<i>C5(%)</i>					
01-10	2,33	97,66	0,02	0,00	0,02
11-20	0,00	39,21	60,76	0,03	60,79
21-30	0,00	45,57	49,17	5,26	54,43
31-40	0,17	53,56	44,80	1,46	46,26
41-50	0,00	44,80	53,53	1,66	55,19

Analisando os mapas de isolinhas da Figura 13 com os dados da Tabela 8, nota-se que os valores de RMSP no corte C1 (Figura 13a) em todas as profundidades, estão

quase que totalmente na faixa com valores de RMSP menores que 4 MPa, com destaque para a camada superficial, em que os valores de RMSP (99,87 % da área total) são classificados como baixos (0 a 2 MPa), segundo escala adotada. Percebe-se que o corte C3 (Figura 13c) se destaca perante os demais, pois possui grande concentração de áreas com valores de RMSP > 4 MPa, ou seja, com indicação de compactação, em todas as camadas, atingindo 95,62% de sua área total na camada mais profunda, comportamento compatível com a representação da curva de RMSP pela profundidade da Figura 7. De maneira geral, nota-se que as áreas com indicação de compactação (> 4 MPa), de cada corte, estão distribuídas de forma semelhantes entre as camadas a partir da profundidade de 11 cm.

Observa-se que as áreas com valores de RMSP classificadas como muito alta (> 6 MPa) concentram-se em sua maioria em regiões laterais próximas aos carregadores, que são responsáveis pelo tráfego direto de máquinas agrícolas pesadas, contribuindo assim, para o aumento da compactação nestas áreas. Este fato também foi observado por Silva V. et al. (2004), que estudando a RMSP em Latossolos, constataram que a RMSP apresentou uma distribuição em faixas, saindo de um estado de maior compactação na cabeceira da lavoura, devido à influência de tráfego de máquinas nos carregadores e diminuindo para o centro da lavoura. Outra causa possível que possa explicar o aumento de RMSP localizada nestas áreas é a possibilidade de serem utilizadas como locais de manobras e manutenção das máquinas agrícolas durante a execução de operações mecanizadas.

Evidencia-se, portanto, que o tipo de solo e o número de cortes influenciam sobremaneira os resultados que se pode obter com o manejo da cultura, uma vez que o tráfego de máquinas e equipamentos neste sistema de produção é intensivo, pelo fato de se tratar de uma cultura semiperene tendo em média cinco cortes antes da renovação do canavial (IAIA et al., 2006)

4.4. Resistência mecânica do solo à penetração na fileira de plantio

4.4.1. Análise estatística descritiva

A Tabela 9 contém a estatística descritiva de resistência mecânica do solo à penetração (RMSP) da fileira de plantio (FIL).

TABELA 9. Estatística descritiva de RMSP da FIL.

Resistência Mecânica do Solo a Penetração							
Prof (cm)	Média (Mpa)	Mediana (Mpa)	Máximo (Mpa)	Coeficientes			1 d
				Variação (%)	Assimetria	Curtose	
(C1)							
1-10	0,93	0,59	3,27	81,30	0,86	-0,29	0,19
11-20	1,51	1,31	5,78	67,08	0,99	0,90	0,10
21-30	1,91	1,90	6,73	58,62	0,97	1,98	0,07
31-40	2,14	2,05	5,35	45,16	0,68	1,12	0,07
41-50	2,36	2,28	5,38	31,95	1,20	2,61	0,11
(C2)							
1-10	0,98	0,81	3,90	75,66	0,94	0,42	0,11
11-20	2,00	1,89	4,80	50,97	0,49	-0,29	0,07
21-30	2,43	2,46	5,29	52,79	0,11	-0,95	0,06
31-40	3,34	3,37	6,72	37,34	0,01	-0,14	0,02
41-50	3,93	3,87	8,34	27,41	0,58	0,59	0,06
(C3)							
1-10	0,68	0,52	4,18	89,94	2,31	8,19	0,14
11-20	1,71	1,66	4,28	55,12	0,58	0,04	0,07
21-30	2,51	2,34	12,88	65,65	2,82	13,47	0,10
31-40	3,86	3,24	16,80	61,61	3,40	14,35	0,18
41-50	5,56	5,42	17,39	43,68	2,33	8,99	0,13
(C4)							
1-10	1,17	0,87	9,10	93,72	2,36	9,40	0,15
11-20	2,95	2,73	8,10	41,59	1,02	1,44	0,08
21-30	3,60	3,43	9,12	41,29	1,03	1,68	0,11
31-40	4,71	4,36	11,65	38,18	1,69	3,51	0,17
41-50	5,41	4,98	12,81	36,93	1,53	2,61	0,12
(C5)							
1-10	1,36	1,03	8,01	90,44	1,68	3,82	0,14
11-20	2,91	2,81	12,25	43,14	1,99	10,72	0,06
21-30	3,30	3,11	11,21	48,89	1,85	6,02	0,13
31-40	4,14	3,87	14,75	47,90	1,54	4,64	0,11
41-50	4,96	4,49	11,07	36,80	1,13	0,94	0,11

¹ d: teste de normalidade; ^{ns} não significativo a 5% de probabilidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov.

O coeficiente de variação (CV%) da camada 41-50 de C2 foi classificado como alto ($20\% < CV < 30\%$) conforme Pimentel-Gomes (2000). Os demais valores de CV% foram classificados como muito alto, superiores a 30%, indicando alta variabilidade dos dados, concordando com os resultados obtidos por Souza et al. (2006), quando analisou dados de RMSP para latossolos.

Em todos os intervalos de profundidade avaliados nas áreas experimentais, quanto a RMSP, apresentaram valor d significativos a 5% de probabilidade pelo teste Kolmogorov-Smirnov, confirmando assim o comportamento dos valores da assimetria e curtose, que não estão próximos a zero, indicando que os dados não apresentam normalidade.

Na Figura 14 encontram-se representadas as curvas de valores médios de RMSP por profundidade, extraídos da Tabela 9, nos cortes 1 a 5.

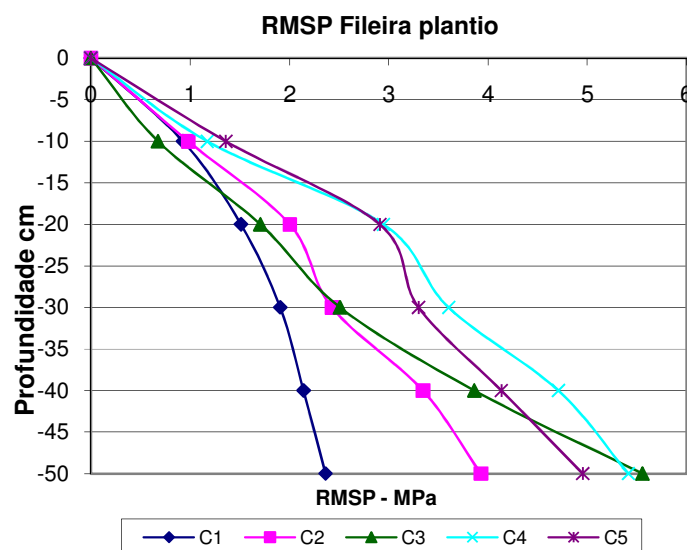


FIGURA 14. Curvas de valores médios de RMSP de FIL dos cortes 1 a 5.

Analisando o gráfico da Figura 14 juntamente com os dados da Tabela 9, percebe-se que existe aumento da RMSP no perfil do solo em todos os cortes, com destaque a última camada de profundidade, que possui o maior valor de RMSP. Este

fato pode estar associado à operação de subsolagem no momento de preparo do solo, que segundo informações levantadas, foi executado na profundidade de 45 a 50 cm.

4.4.2. Análise estatística espacial

A Tabela 10 contém os parâmetros que definem os semivariogramas da variável RMSP na fileira de plantio, apresentados nas Figuras 15 a 19.

TABELA 10. Geoestatística de RMSP – FIL.

<i>Resistência Mecânica do Solo a Penetração</i>								
<i>Prof (cm)</i>	<i>Modelo</i>	<i>Efeito Pepita(C_0)</i>	<i>Patamar (C_0+C)</i>	<i>Alcance (a) m</i>	<i>¹ADE</i>	<i>²SQR</i>	<i>³R²</i>	<i>VC</i>
<i>(C1)</i>								
1-10	Gaussiano	0,000	0,167	76,04	99,0	0,003	0,850	0,31
11-20	Gaussiano	0,001	0,920	63,57	99,0	0,186	0,749	0,13
21-30	Gaussiano	0,001	1,264	67,03	99,0	0,511	0,723	0,20
31-40	Gaussiano	0,001	0,912	73,96	99,0	0,159	0,820	0,32
41-50	Gaussiano	0,009	0,586	65,82	98,0	0,022	0,853	0,91
<i>(C2)</i>								
1-10	Gaussiano	0,000	0,258	76,21	100,0	0,020	0,850	0,97
11-20	Exponencial	0,119	0,895	61,20	87,0	0,088	0,749	0,93
21-30	Gaussiano	0,001	1,615	75,34	100,0	0,245	0,723	0,82
31-40	Gaussiano	0,001	1,195	68,42	100,0	0,222	0,820	0,57
41-50	Exponencial	0,053	0,902	56,10	94,0	0,079	0,853	0,47
<i>(C3)</i>								
1-10	Exponencial	0,060	0,189	216,00	68,0	0,003	0,399	0,18
11-20	Exponencial	0,369	0,689	125,00	46,0	0,058	0,234	0,71
21-30	Esférico	0,914	2,406	130,60	62,0	0,094	0,770	0,72
31-40	Esférico	0,270	5,634	90,20	95,0	2,290	0,342	0,63
41-50	Gaussiano	0,010	5,263	79,15	99,0	6,750	0,529	0,17
<i>(C4)</i>								
1-10	Gaussiano	0,000	0,292	56,47	100,0	0,027	0,711	0,50
11-20	Gaussiano	0,001	0,919	50,75	99,0	0,197	0,689	0,29
21-30	Gaussiano	0,001	1,278	42,08	99,0	0,370	0,474	0,40
31-40	Gaussiano	0,001	2,188	77,08	100,0	1,520	0,699	0,75
41-50	Exponencial	0,010	3,495	127,50	99,0	0,793	0,810	0,90
<i>(C5)</i>								
1-10	Gaussiano	0,106	0,668	47,98	84,0	0,034	0,210	0,48
11-20	Exponencial	0,142	1,172	85,50	88,0	0,271	0,171	0,85
21-30	Exponencial	0,217	2,341	75,30	91,0	2,110	0,053	0,65
31-40	Esférico	1,074	2,655	207,10	60,0	2,410	0,397	0,87
41-50	Esférico	0,001	2,097	53,90	100,0	0,404	0,163	0,73

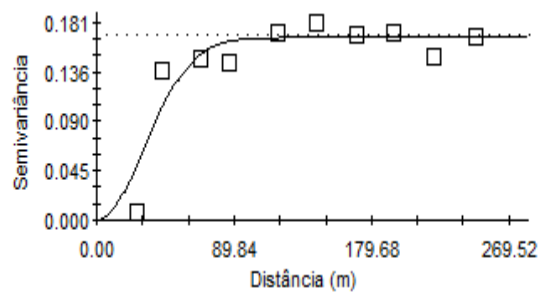
¹ ADE – Avaliador da Dependência Espacial; ² SQR – Soma dos quadrados dos resíduos; ³ R² – coeficientes de determinação; ⁴ VC – Validação cruzada (coeficiente angular). C_i = i-ésimo corte da cana-de-açúcar (i = 1 a 5).

A RMSP dos cortes apresentou dependência espacial em todas as profundidades estudadas expressa por meio de modelos de semivariograma. Os dados de RMSP ajustaram-se ao modelo gaussiano nas profundidades 01-10, 11-20, 21-30, 31-40 e 41-50 de C1; 1-10, 21-30 e 31-40 de C2; 41-50 de C3; 1-10, 11-20, 21-30, 31-40 de C4; 1-10 de C5, exponencial nas profundidades 11-20, 41-50 de C2; 01-10, 11-20 de C3; 41-50 de C4; 11-20, 21-30 de C5 e esférico para as demais camadas.

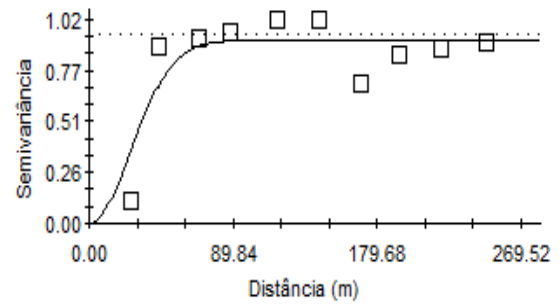
A análise do parâmetro avaliador de dependência espacial (ADE) indicou forte dependência espacial para todas as profundidades, com exceção das camadas 1-10, 11-20 e 21-30 de C3 e 31-40 de C5 que apresentaram ADE classificados como moderados.

Cardim e Cataneo (2005) explicam que o alcance da dependência espacial fornece informações sobre a distância em que os pontos amostrados estão parcialmente correlacionados. Ou seja, a distâncias iguais ao alcance existe dependência espacial, podendo ser estimados valores não amostrados dentro deste alcance para a variável. Por conseguinte, pontos separados por distâncias superiores ao alcance, são considerados independentes entre si. Percebe-se que os valores de alcance são variados entre as profundidades e entre os cortes. Os maiores alcances foram encontrados nas profundidades 01-10 de C3 com 216,0 m e 31-40 de C5 com 207,1 m. O menor valor de alcance (42,08 m) está localizado na camada 21-30 cm de C4.

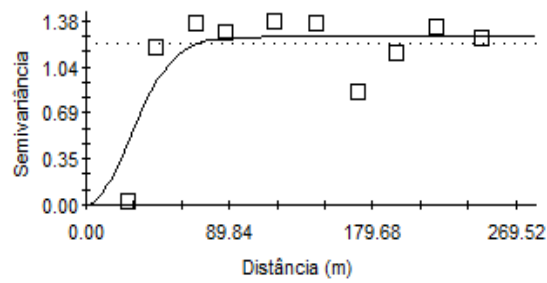
Observa-se que todos os valores de alcance obtidos foram maiores que o valor de espaçamento entre as amostragens, indicando que as amostras estão correlacionadas umas a outras, o que permite que se façam interpolações (VIEIRA, 2000).



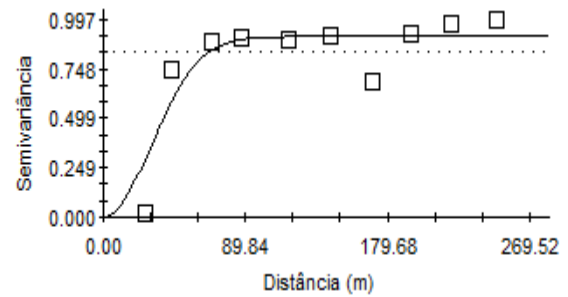
(a)



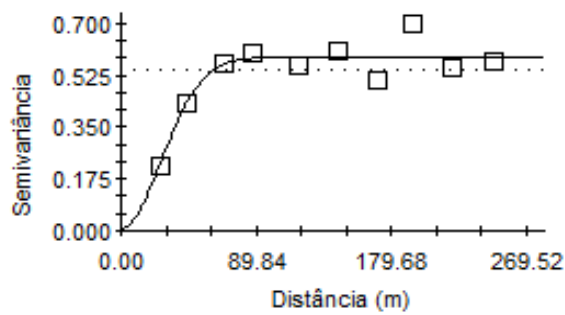
(b)



(c)

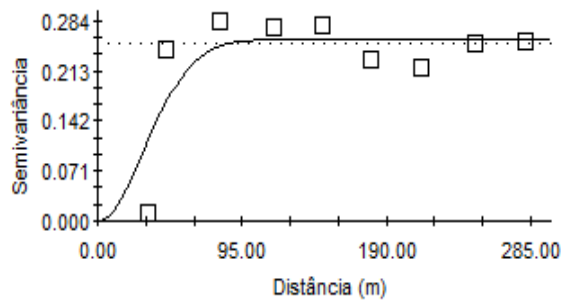


(d)

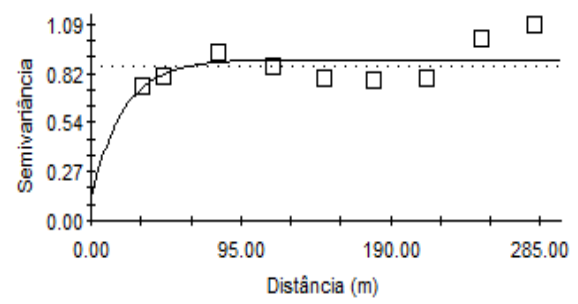


(e)

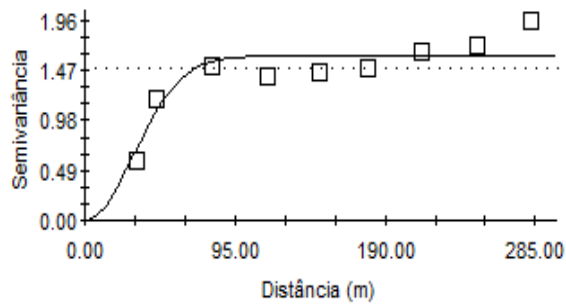
FIGURA 15. Semivariogramas ajustados do 1º corte (C1) de FIL para as profundidades 01-10 (a), 11-20 (b), 21-30 (c), 31-40 (d) e 41-50 cm (e).



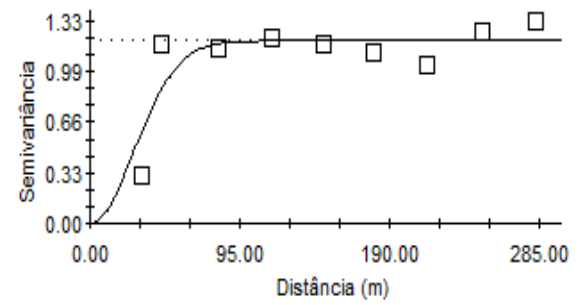
(a)



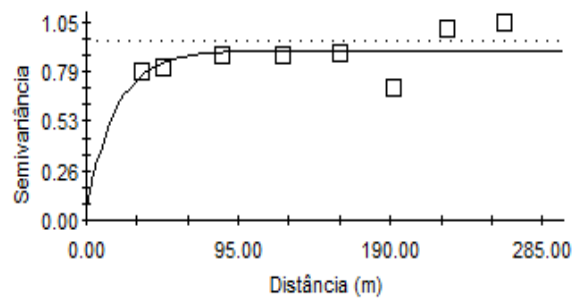
(b)



(c)



(d)



(e)

FIGURA 16. Semivariogramas ajustados do 2º corte (C2) de FIL para as profundidades 01-10 (a), 11-20 (b), 21-30 (c), 31-40 (d) e 41-50 cm (e).

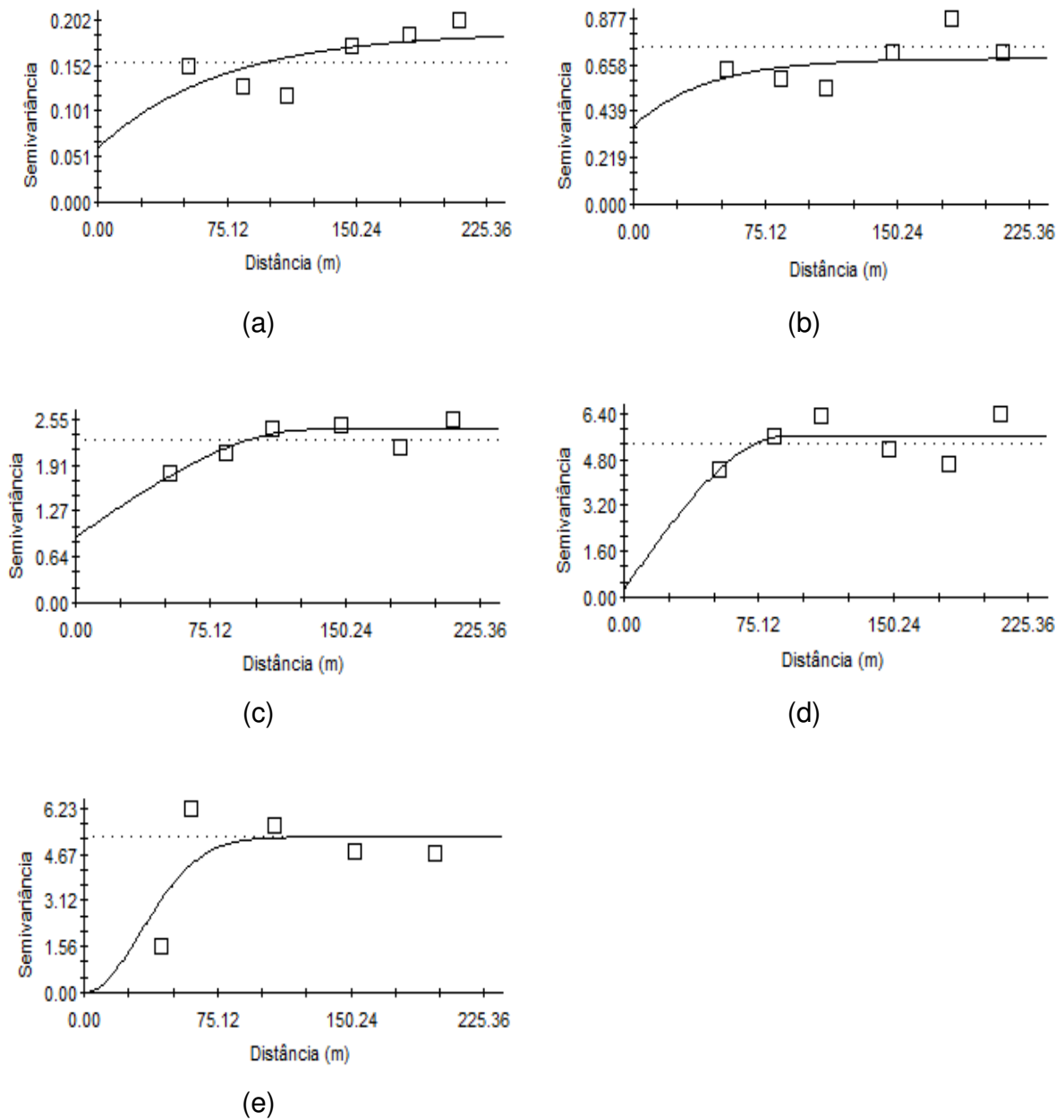
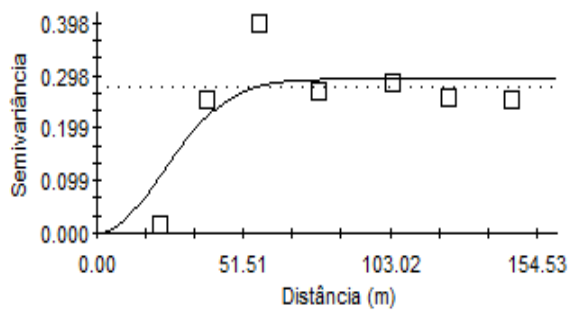
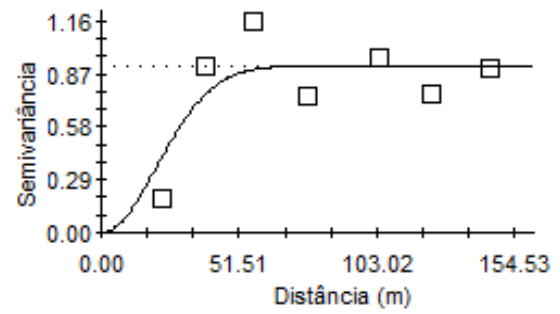


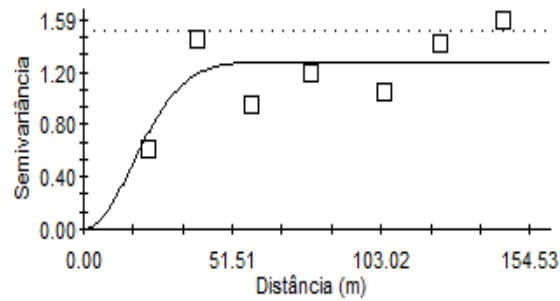
FIGURA 17. Semivariogramas ajustados do 3º corte (C3) de FIL para as profundidades 01-10 (a), 11-20 (b), 21-30 (c), 31-40 (d) e 41-50 cm (e).



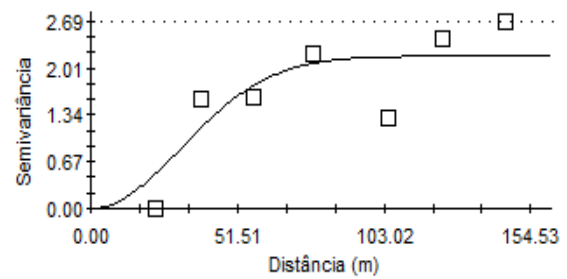
(a)



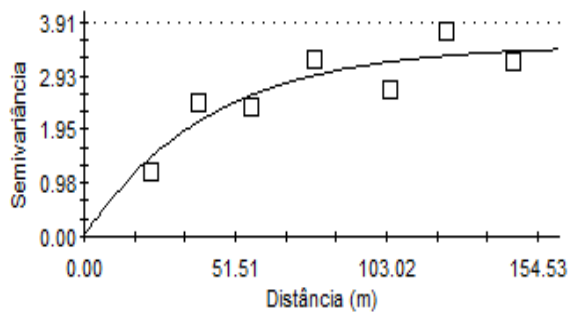
(b)



(c)

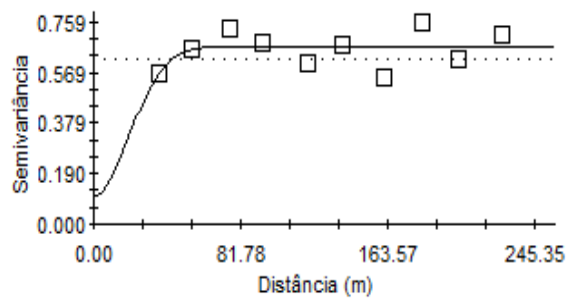


(d)

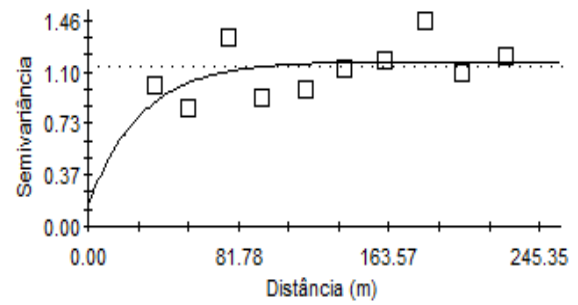


(e)

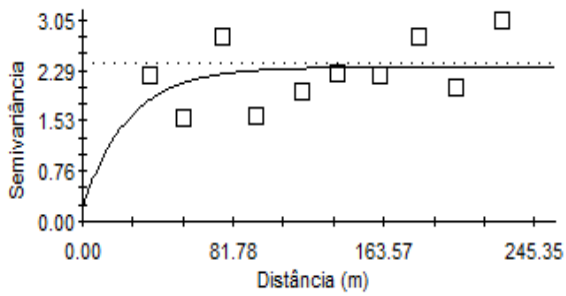
FIGURA 18. Semivariogramas ajustados do 4º corte (C4) de FIL para as profundidades 01-10 (a), 11-20 (b), 21-30 (c), 31-40 (d) e 41-50 cm (e).



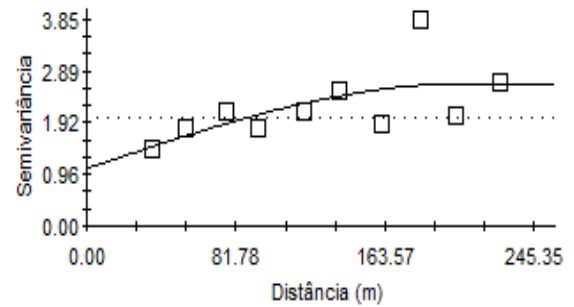
(a)



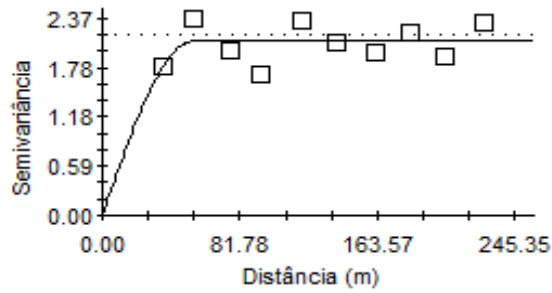
(b)



(c)



(d)



(e)

FIGURA 19. Semivariogramas ajustados do 5º corte (C5) de FIL para as profundidades 01-10 (a), 11-20 (b), 21-30 (c), 31-40 (d) e 41-50 cm (e).

Nota-se que os valores do patamar estão próximos aos valores da variância dos dados, que está representada nos gráficos de semivariância como a linha pontilhada. Segundo Vieira (2000), este fato demonstra que os dados provavelmente poderão ser estacionários de ordem 2, porque têm um patamar claro e definido e, com toda certeza, estarão sob a hipótese intrínseca.

Os parâmetros dos modelos dos semivariogramas ajustados foram utilizados no método de interpolação por meio da krigagem ordinária. Estes mapas de isolinhas apresentados na Figura 20 foram gerados utilizando-se o software Surfer® 8.0 (SURFER, 2007)

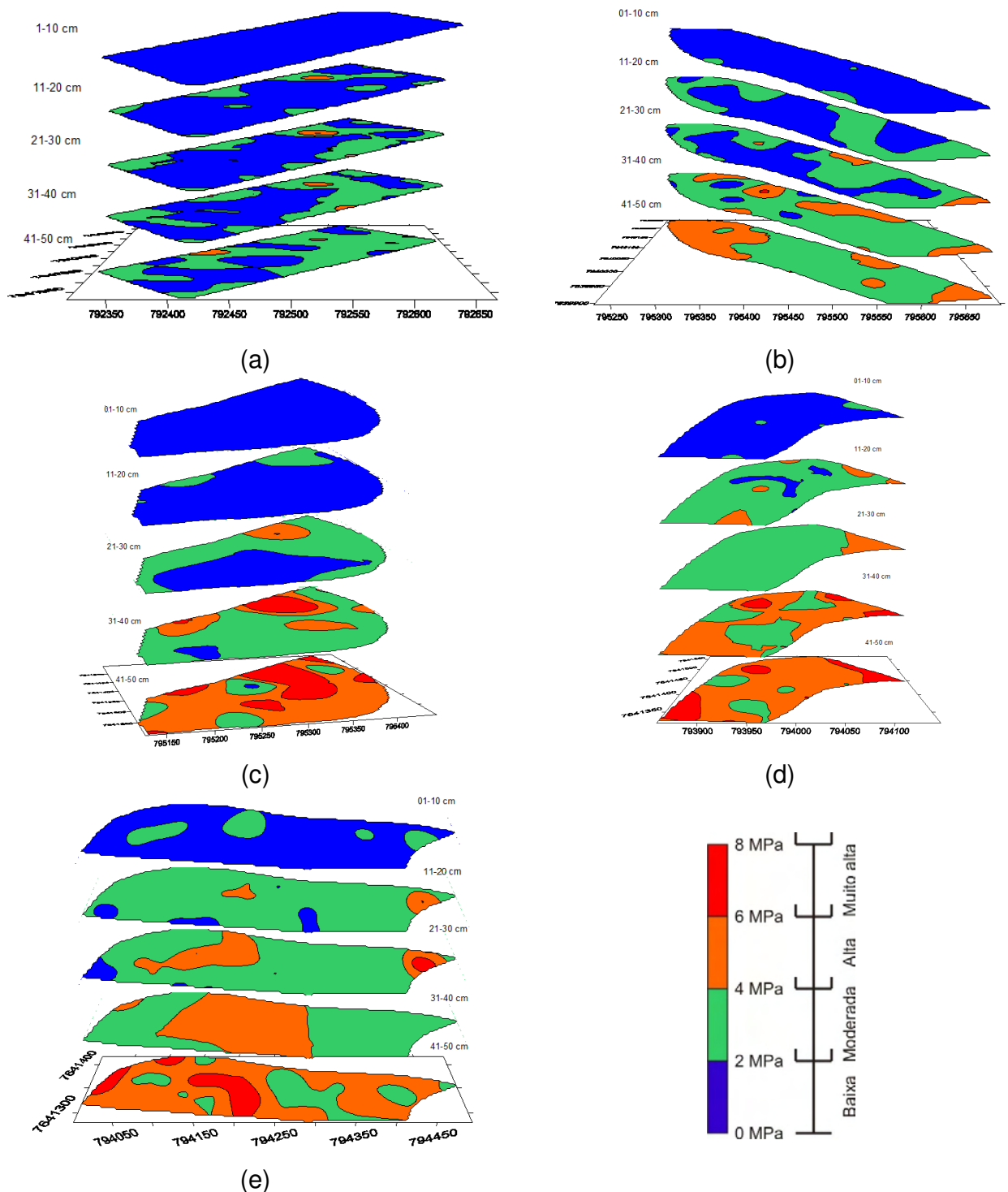


FIGURA 20. Mapas de Espacialização de valores médios de RMSR na fileira de plantio para camadas 01-10, 11-20, 21-30, 31-40 e 41-50 cm das áreas experimentais 1º corte (a), 2º corte (b), 3º corte (c), 4º corte (d) e 5º corte (e).

Na Tabela 11 são apresentados os valores percentuais da área total dos cortes inseridas na faixa de valores de RMSP, definidas como baixo (0 a 2 MPa), médio (>2 a 4 MPa), alto (>4 a 6 MPa) e muito alto (acima de 6 MPa) segundo a escala adotada baseada nas indicações de Torres e Saraiva (1999), Roque et al. (2003) e Taylor et al. (1966). Para a determinação do percentual de áreas que estão inseridas entre faixas de valores de RMSP visualizadas nos mapas de isolinhas, utilizou-se a função Volume do software aplicativo Surfer[®] 8.0 (SURFER, 2007).

TABELA 11. Distribuição de áreas nos intervalos de RMSP na FIL.

Prof (cm)	Distribuição de áreas na FIL				
	Intervalos (MPa)				
	0-2	2-4	4-6	6-8	>4
<i>C1(%)</i>					
01-10	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11-20	78,66	20,05	1,29	0,00	1,29
21-30	62,19	35,61	2,18	0,02	2,20
31-40	50,01	48,36	1,63	0,00	1,63
41-50	33,36	64,66	1,98	0,00	1,98
<i>C2(%)</i>					
01-10	97,39	2,61	0,00	0,00	0,00
11-20	53,64	46,36	0,00	0,00	0,00
21-30	42,87	53,24	3,89	0,00	3,89
31-40	6,27	70,64	22,79	0,30	23,09
41-50	0,00	56,68	43,32	0,00	43,32
<i>C3(%)</i>					
01-10	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11-20	86,13	13,87	0,00	0,00	0,00
21-30	35,14	56,37	8,43	0,06	8,49
31-40	2,70	68,15	19,22	9,93	29,16
41-50	0,47	13,88	59,83	25,83	85,65
<i>C4(%)</i>					
01-10	96,33	3,67	0,00	0,00	0,00
11-20	8,30	83,67	8,03	0,00	8,03
21-30	0,00	90,53	9,47	0,00	9,47
31-40	0,00	32,31	59,61	8,09	67,69
41-50	0,00	10,24	73,78	15,98	89,76
<i>C5(%)</i>					
01-10	84,88	15,12	0,00	0,00	0,00
11-20	5,30	89,97	4,72	0,01	4,73
21-30	2,86	76,94	18,78	1,42	20,20
31-40	0,00	57,05	42,95	0,00	42,95
41-50	0,00	22,52	64,52	12,96	77,48

Analisando a Figura 20 com os dados da Tabela 11, percebe-se que à medida que se aumenta a profundidade, ocorre o surgimento de áreas com maior valor de RMSP. Nota-se também que a camada mais profunda, com exceção do corte 1 (C1) é a

que mais possui concentração de áreas com valores de RMSP maior que 4 MPa, com destaque para o corte 4 (C4) que possui 89,76% de sua área total com valores de RMSP acima de 4 MPa, indicando a existência de compactação do solo. O corte 1 (C1), em todas as camadas de profundidade, praticamente não possui áreas com indicação de compactação (>4 MPa). A camada superficial de todos os cortes contém 0% de áreas com valores de RMSP maiores que 4 MPa. Este fato corrobora com a indicação do gráfico da Figura 14, cuja característica reforça que os valores mais baixos de RMSP estão nas camadas mais superficiais, enquanto que os valores mais altos de RMSP concentram-se nas camadas mais profundas.

5. CONCLUSÃO

A RMSP no perfil até 50 cm, em todos os cortes, é influenciada pelo tráfego de máquinas agrícolas.

O primeiro corte tanto para entrefileira e fileira, apresenta menor RMSP em todas as camadas quando comparado com os demais cortes.

O terceiro corte apresenta maior quantidade de zonas com altos valores de RMSP (4 a 6 MPa) no estudo da entrefileira.

A variabilidade espacial da RMSP possibilitou a identificação de regiões com valores críticos ($RMSP > 4$ MPa) para o desenvolvimento da cana-de-açúcar.

A compactação na entrefileira concentrou-se em camadas mais superficiais e ao longo do perfil, ao passo que na fileira a compactação concentrou-se em camadas mais profundas.

6. IMPLICAÇÕES

Seguem algumas sugestões de trabalhos futuros, relacionados a esta pesquisa: a) coletar dados de RMSP nas áreas experimentais após a colheita mecanizada da cana-de-açúcar, para se verificar a variação da compactação no mesmo talhão de estudo ao longo das épocas de corte; b) analisar a variabilidade espacial do relevo, do tipo de solo e fertilidade, no sentido de dar enfoque a Agricultura de Precisão (AP).

Vários pesquisadores relatam que existe certa dificuldade para se determinar a malha amostral, ou seja, o dimensionamento da quantidade e localização de pontos a serem coletados. Dentro deste contexto, sabe-se que quanto maior a quantidade de pontos de uma malha amostral maior será a precisão no momento da geração de mapas por meio da krigagem, contudo maior será o custo relacionado à coleta destes pontos. De outra forma, com a obtenção de menos pontos dentro de uma mesma área, tem-se uma malha amostral menos densa, acarretando assim, em menor custo amostral, porém pode-se ter como consequência mapas poucos precisos, ou seja, insuficientes para a caracterização dos atributos em estudo. O que se busca é a determinação correta da malha amostral a fim se obter mapas precisos com um custo amostral compatível. Seguindo este pensamento, tentou-se aplicar este conceito na metodologia do experimento, obtendo assim, a caracterização da área experimental, com um custo amostral realístico.

Notou-se que o maior valor de alcance (A) encontrado foi na fileira com 216 m na camada superficial de C3.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASAE. AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Soil cone penetrometer. In: **ASAE standards 1996**: standards engineering practices data. St. Joseph, 1996. p.719. (ASAE S313.3).

BARBOSA, J. A.; DIAS JUNIOR, M. S.; VIEIRA, L. B.; DIAS, G. P. Resistência ao cisalhamento de um Argissolo Vermelho-Amarelo submetido ao tráfego de um trator agrícola. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**. 2004, vol.8, n.2-3, pp. 321-325. ISSN 1415-4366.

BIANCHINI, A.; MAIA, J. C. S.; MAGALHÃES, P. S. G.; CAPPELLI, N.; UMEZU, C. K. Penetrógrafo eletrônico automático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.2, p.332-336, 2002.

CAPPELLI, N. L.; UMEZU, C. K.; CAMPOS, R. F. Push cone eletrônico de baixo custo para estudo da resistência mecânica ao desenvolvimento radicular das plantas. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental*, **Campina Grande**, v.5, n.3, p.525-529, 2001.

CAMARGO, E.C.G. **Geoestatística: fundamentos e aplicações**. In: Câmara, G. & Medeiros, J.S. eds. Geoprocessamento para projetos ambientais. São José dos Campos: INPE, 1998. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/5geoest.pdf>.

CARDIM, D.; CATANEO, A. Distribuição espacial da produtividade média anual da cultura do feijão no Estado de São Paulo e sua correlação com índices climáticos. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 20, n. 1, p. 11-28, 2005.

CARVALHO, J. R. P.; SILVEIRA, P. M.; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 8, p. 1151-1159, ago. 2002.

CASTRO, O. M. **Comportamento físico e químico de um latossolo Roxo em função do seu preparo na cultura do milho (Zeamays I.)**. Tese (Doutorado) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

CORÁ, J. E.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo antes e após calagem e fosfatagem em doses variadas na cultura de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, vol. 26, n.2, pp. 374-387, ago. 2006.

CORTEZ, J. W.; FERNANDES, A. L. T.; FILHO, A. C.; SILVA, R. P.; FURLANI, C. E. A.; RIBEIRO, C. A. Análise espacial da compactação do solo por meio do penetrômetro eletrônico. In: Congresso brasileiro de agricultura de precisão, 2008, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: USP/ESALQ. 1 CD-ROM.

DLG AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL LTDA. Setor de publicações técnicas. **Manual do usuário: Penetrômetro Geo-Refenciado Motorizado**. Rev.: 2.00-08. 2008. Disponível em: <www.dlg.com.br>. Acesso em: 10 set. 2009, 8:9.

DUIKER, S. W. **Diagnosing soil compaction using a penetrometer (soil compaction tester)**. 2002. The Pennsylvania State University, 112 Agricultural Administration Building, University Park, PA 16802.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de levantamento e conservação do solo. **Manual de métodos e análise de solo**. Rio de Janeiro, 1979.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Serviço Nacional de levantamento e conservação do solo. **Sistema brasileiro de classificação de Solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação, 1999. 412 p.

FURLANI, C. E. A.; CORTEZ, J. W.; CARVALHO FILHO, A.; SILVA, R. P.; GROTTA, D. C. C. Geoestatística para análise da compactação do solo na Entrelinha do cafeeiro em diferentes épocas. In: Congresso brasileiro de agricultura de precisão, 2008. **Anais...** Piracicaba: USP/ESALQ. 1 CD-ROM.

PIMENTEL-GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental**. 14.ed. Piracicaba: Degaspari, 2000. 477 p.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.29, n. 2, p. 169-177, maio/abr. 2005.

HERRICK, J. E.; JONES, T. L. **A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance**. Published in Soil Sci. Soc. Am. J. 66:1320–1324. 2002. <<http://soil.sciijournals.org/cgi/reprint/66/4/1320>>. Acesso em: 26 fev. 2009.

IAIA, A. M.; MAIA, J. C. S., KIM, M. E. Uso do penetrômetro eletrônico na avaliação da resistência do solo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.2, p.523-530, 2006.

IBGE. Instituto brasileiro de geografia e estatística. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/default.shtm>> Acesso em: 21 fev.2010.

JAKOBSEN, B. F.; GREACEN, E. L. Compaction of sandy forest soils by forwarder operations. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, 5:55-70, 1985.

JANK, M. S. Cana-de-açúcar - o novo paradigma da energia limpa e renovável. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/opinioao/show.asp?msgCode={388F00C1-93A1-4752-842F-DEE18769F62E}>> Acesso em: 15 mar.2009.

LANDIM, P. M. P. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: Fundação Editora da UNESP, 1998. 226 p.

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**, Viçosa-MG, v.32, n.5, p.931-938, 2008.

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

MINITAB Inc. (2004). **MINITAB Statistical Software, Release 14 for Windows**, State College, Pennsylvania. MINITAB® is a registered trademark of Minitab Inc.

PERUMPRAL, J.V. **Cone penetrometer application - A review**. Transaction of the ASAE, St. Joseph, v.30, n.4, p.939-944, 1987.

REINERT, D. J.; COLLARES, G. L.; REICHERT, J. M. Penetrômetro de cone com taxa constante de penetração no solo: desenvolvimento e teste de funcionalidade. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.1, p.304-316, jan./abr. 2007.

RIBON, A.; CENTURION, J.; CENTURION, M.; PEREIRA, G. Densidade e resistência a penetração de solos cultivados com seringueira sob diferentes manejos - DOI: 10.4025/actasciagron.v25i1.2147. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Brasil, 25 abr. 2008. Disponível em: <<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/2147>>.

RICHART, A.; TAVARES, J. F.; BRITO, O. R.; LLANILLO, R. F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, n. 3, p. 321-344, jul./set. 2005.

ROBERTSON, G. P. GS+: **Geostatistics for the Environmental Sciences**. Gamma Design Software, Plainwell, Michigan USA. 2008.

ROONEY, D.; STELFORD, M.; LANDOLT, D. Site-Specific Soil Compaction Mapping Using Digital Penetrometer. **Foundation for Agronomic Research (FAR) – USDA-CSREES**.2000.[http://www.ipni.net/ppiweb/ppibase.nsf/b369c6dbe705dd13852568e3000de93d/f17e0a3893def3f085256ab5005bca51/\\$FILE/SSMG34.pdf](http://www.ipni.net/ppiweb/ppibase.nsf/b369c6dbe705dd13852568e3000de93d/f17e0a3893def3f085256ab5005bca51/$FILE/SSMG34.pdf)>.

ROQUE, C. G. ; CENTURION, J. F. ; ALENCAR, G. V. ; BEUTLER, A. N. ; PEREIRA, G. T. ; ANDRIOLI, I. Comparação de dois penetrômetros na avaliação da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho sob diferentes usos. **Acta Scientiarum** (UEM), Maringá, v. 25, p. 53-57, 2003.

SILVA, G.; CAPPELLI, N. L.; UMEZU, C. K. Métodos probabilístico e determinístico para diagnóstico da necessidade de subsolagem de solos agrícolas. **Engenharia Agrícola**, vol.24, n.1, pp. 130-141, 2004. ISSN 0100-6916.

SILVA, R. P.; SOUZA, F. G.; CORTEZ, J. W.; FURLANI, C. E. A.; VIGNA, G. P. Variabilidade espacial e controle estatístico do processo de perdas na colheita mecanizada do algodoeiro. **Engenharia Agrícola**, 2007, vol.27, n.3, pp. 742-752. ISSN 0100-6916.

SILVA, R. P.; CORREA, C. F.; CORTEZ, J. W.; FURLANI, C. E. A.. Controle estatístico aplicado ao processo de colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, 2008, vol.28, n.2, pp. 292-304.

SILVA, W. F.; AGUIAR, D. A.; RUDORFF, B. F. T.; SUGAWARA, L. M.; AULICINO, T. L. I. N. Análise da expansão da área cultivada com cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil: safras 2005/2006 a 2008/2009. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 467-474. DVD, On-line. ISBN 978-85-17-00044-7. (INPE-16028-PRE/10637). Disponível em:

<<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.19.04>>. Acesso em: 13 jan. 2010.

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, mar-abr, 2004.

SIQUEIRA, G. M. **Variabilidade de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos**. 2006. 182 f. Dissertação (Mestrado), Instituto Agrônomo de Campinas, 2006.

SOUZA, M. Z.; CAMPOS, C. C. C.; CAVALCANTE, L. H. I.; MARQUES JUNIOR, J.; CESARIN, G. L.; SOUZA, R. S. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e do teor de água sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.1, p.128-134, jan-fev, 2006.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; BENTO, M. J. C. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, vol.8, n.1, pp. 51-58, 2004.

SURFER 8, **Users Guide/ Contouring and 3D Surface Mapping for Scientists and Engineers**, Golden Software, Inc., New York, USA, 639p. 2007.

TAYLOR, H.M. *et al.* Soil strength-root penetration for medium- to coarse-textured soil materials. **Soil Sci.** Madison., v.102, p.18-22, 1966.

TOLEDO, A.; TABILE, R. A.; PEREIRA, J. O.; GREJIANIN, R. L.; ANDREOLLA, V. R. M.; KONOPATZKI, M. R. S. Efeito do sistema de cultivo e da compactação na propriedade estrutural de um solo argiloso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 35, 2006, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2006. 1 CD-ROM.

TOLEDO, A. **Variabilidade espacial e diagnóstico da qualidade e do processo em semeadura de amendoim.** 2008. 96 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2008.

TOLEDO, A.; RIBEIRO, C. A.; FURLANI, C. E. A.; SILVA, R. P. Penetrógrafo eletrônico automático acoplado a quadriciclo para aplicação em agricultura de precisão. In: VII Congresso Brasileiro de Agroinformática, 2009, Viçosa - MG. **Anais....** Lavras - MG : SBIAgro, 2009. v. 1. p. 1-6.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja.** Londrina: Embrapa Soja, 1999. 58p.

VENDRUSCULO, L. G. **Desenvolvimento de um sistema computacional para análise geoestatística.** 2001. 87 f. Dissertação (Mestrado), Universidade de Campinas, Campinas, 2001.

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

WOLLENHAUPT, N.C.; MULLA, D.J.; CRAWFORD, G. **Soil sampling and interpolation techniques for mapping spatial variability of soil properties.** In: PIERCE, F.J.; SADLER, E.J. The state of site-specific management for agriculture. Madison, 1997. p.19-53.

APÊNDICE

APÊNDICE A: Especificações Técnicas Penetrômetro DLG PNT2000M

TABELA 1A. Características do Penetrômetro PNT2000M

Tipo	Parâmetro	
Alimentação	Bateria interna recarregável de 3,6 Vdc Carregador de bateria inteligente em fonte 110/220 Vca Bateria externa de 12Vcc	
Tipos de Cones	De acordo com a norma ASAE S313.3: - Cone tipo 1 (grande) : 323 mm ² - Cone tipo 2 (médio) : 129 mm ² Não Normalizados - Cone tipo 3 (pequeno) : 71,25 mm ²	
Bateria Externa	Tensão	12 Vcc
	Corrente Consumida	15 A (máx.)
Penetrador Automático	Por meio de rosca sem fim de 4 entradas	
Profundidade máxima de penetração	550 mm	
Medição de Força	Célula de carga de capacidade máxima de 1500 N	
Medição de Profundidade	Por sensor indutivo e roda fônica, precisão de 2 mm	
Comunicação com GPS	Protocolo de comunicação NMEA-0183	
Comunicação com o computador	Interface serial RS-232C	
Capacidade de Memória	2048 ensaios	
Hastes de Penetração	Todas as hastes são partidas em duas partes. - Haste tipo 1 (grossa) : 325 mm x (D) ø 1,587 mm (5/8") - Haste tipo 2 (média) : 325 mm x (D) ø 0,952 mm (3/8") - Haste tipo 3 (fina) : 325 mm x (D) ø 0,793 mm (5/16")	
Material de Construção	Hastes e Cones	Aço INOX
	Impugnadora	Aço Carbono Pintado em EPOXI
	Caixa de Instrumentos	Plástico ABS

Fonte: DLG Automação Industrial Ltda (2008)

Cone	ϕd (mm)	h (mm)	Área (mm ²)
Tipo 1	20,27	37,80	323 mm ²
Tipo 2	12,83	23,90	129 mm ²
Tipo 3	9,525 (3/8")	17,80	71,25 mm ²

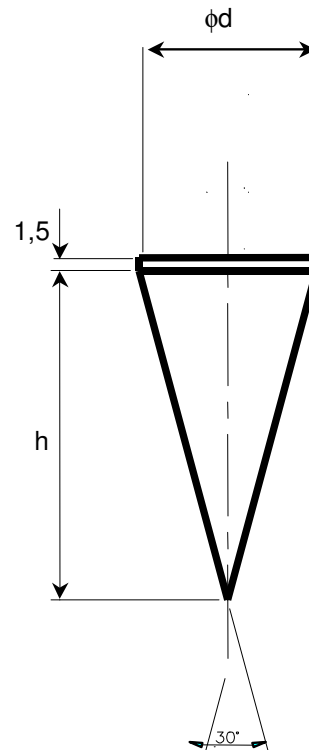


FIGURA 1A. Cones Tipo 1 e Tipo 2 normalizados pela norma ASAE S313.3

Dessa forma, a Resistência a Penetração (RP) pode ser calculada da seguinte forma:

$$RP = \frac{F}{A}$$

Em que:

RP = Resistência a Penetração (Índice de Cone), em Pa (pascal)
 F = Força exercida no cone, em N (newtons).
 A = Área da seção transversal do cone, em m².