



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

Centro de Ciências Agrárias

Departamento de Solos e Engenharia Rural

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO EM SOLO
SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE COLHEITA DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Maíra da Cunha Souza

**Areia, PB
Agosto - 2017**

MAÍRA DA CUNHA SOUZA

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO EM SOLO
SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE COLHEITA DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para obtenção do título de "Mestre em Ciência do Solo".
Área de concentração: Solos em Agroecossistemas Familiares.

Orientador: Prof. Flávio Pereira de Oliveira, Dr.

**Areia, PB
Agosto- 2017**

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S729v Souza, Máira da Cunha.

Variabilidade espacial da resistência a penetração em solo sob diferentes condições de colheita de cana-de-açúcar / Máira da Cunha Souza. - João Pessoa, 2018.

46 f. : il.

Orientação: Flávio Pereira de Oliveira. Dissertação (Mestrado) - UFPB/CCA.

1. Compactação do solo. 2. Tráfego controlado.
3. Geoestatística. I. Oliveira, Flávio Pereira de. II. Título.

UFPB/CCA-AREIA

MAÍRA DA CUNHA SOUZA
Tecnóloga em Geoprocessamento – IFPB

DISSERTAÇÃO

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

MESTRE EM CIÊNCIA DO SOLO

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo

Centro de Ciências Agrárias

Universidade Federal da Paraíba

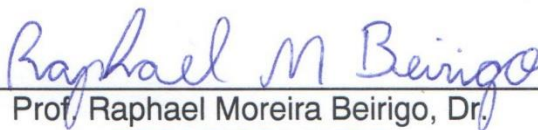
Areia (PB), Brasil.

Aprovada em 31 de Agosto de 2017

Banca examinadora:



Prof. Flávio Pereira de Oliveira, Dr.
PPGCS/CCA/UFPB
Orientador



Prof. Raphael Moreira Beirigo, Dr.
PPGCS/CCA/UFPB
Examinador



Prof. Carlos Lamarque Guimarães, Dr.
IFPB/Campus João Pessoa
Examinador

*“Todo bom agricultor sabe
que é necessário um longo processo
antes de serem plantadas as sementes no solo.
É preciso livrar o terreno dos materiais
que ainda permanecem nele e são desnecessários,
depois arar, aplicar os insumos, esperar o tempo propício
e, aí sim, semear o que pretende colher no futuro.
Mas é inevitável a dúvida,
que invariavelmente brota no processo de demora.
Por mais eficaz e experimentada que tenha sido a técnica de plantio,
surge sempre aquele pequeno medo,
o frio na barriga que tem que ocorrer
antes da apresentação de qualquer artista,
tal qual aquele que trabalha a terra assim o é.
Porque a lida com o solo, assim como a vida,
por mais pensada e teorizada que possa ser,
não é bem uma ciência exata,
e basta qualquer oscilação no comportamento do tempo
para lograr resultados que não havíamos previsto.
Porém, mais do que um jogo de probabilidades,
desenvolver a arte de viver ou trazer vida da terra
é sempre a plena realização de quem ousou colaborar no milagre da criação,
plantando, esperando, crescendo, reproduzindo e morrendo,
mas não sem antes ter certeza de que sua história foi perpetuada.”*

Aos meus pais, Assis e Joana, por toda a confiança que sempre depositaram em mim, aos meus irmãos, Katiane e Amaury, que me ensinaram os preceitos de companheirismo e lealdade, **dedico** essa conquista.

AGRADECIMENTOS

Gratidão é a palavra-chave desse momento. Nesse curto espaço pretendo deixar as normas da ABNT um pouco de lado e me guiar pelas regras que regem o meu coração.

Chegar até aqui parecia um sonho distante e impossível, mas uma força maior me guiou sempre. Uma criatura tão cheia de falhas, mesmo sem merecer, foi agraciada por um Deus imenso. Muito obrigada, meu Senhor!

Meus pais, José de Assis de Souza e Joana da Cunha Souza, sempre me apoiaram nas escolhas que fiz, por mais absurdas que elas pudessem parecer. Depositaram confiança e sobretudo amor em mim... Eles não fazem idéia da diferença que isso fez na minha vida. Sei que muitas vezes sentiram-se impotentes ao me ver fraquejar nas dificuldades encontradas ao longo do caminho, mas mesmo sem saber o silêncio e a oração deles me levaram a descobrir um força dentro de mim que até então não conhecia.

Com meus irmãos, Amaury da Cunha Souza e Katiane da Cunha Souza, aprendi que a vida compartilhada é muito melhor. Katiane é meu espelho, praticamente minha segunda mãe, amiga e companheira de jornada. Devo muito do que sou hoje aos puxões de orelha, orientações e conselhos que dela recebi.

Agradeço a Universidade Federal da Paraíba (UFPB) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS) por me permitirem vivenciar tantas experiências enriquecedoras para a minha profissão e sobretudo para o meu amadurecimento como pessoa.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos que foi primordial para que eu chegasse até aqui.

Ao meu orientador Dr. Flávio Pereira de Oliveira, por toda atenção e paciência que sempre dedicou a minha pessoa. Tive a honra de ser orientada por um ser **humano**, destacado assim, porque ele realmente faz jus a palavra. Sua humanidade, tranquilidade e compreensão fizeram a diferença nos momentos em que pensei em desistir.

A Usina Miriri Alimentos e Bioenergia pela parceria e apoio para a realização desse projeto, desde a concessão de seus funcionários para auxiliar na execução das coletas ao suporte logístico e financeiro que nos foi dado.

Aos professores Raphael Moreira Beirigo e Carlos Lamarque Guimarães por aceitarem fazer parte da banca examinadora e darem valorosas contribuições para este trabalho.

Ao técnico do Laboratório de Física do Solo (LFS), Robeval Diniz Santiago (Vavau) pela paciência, ajuda e ensinamentos durante todo o período das análises.

Aos demais colegas do LFS, o pessoal da graduação, Alison, Antônio, Otávio, Pedro e a PIBIC Júnior, Mylena, pelo auxílio nos momentos que precisei de braços fortes e risos frouxos. E o agradecimento especial aos meus irmãos de orientação da pós-graduação que estiveram comigo desde a coleta, acompanhando a rotina no laboratório e dando forças para continuar, Camila, Danillo e Valdo. Camila se tornou uma grande amiga, sempre solícita e disposta a ajudar. Danillo foi a base forte durante os dias de coleta, menino de grande coração e humildade, que aprendi a admirar e respeitar. Valdo, dispensa comentários, foi um grande co-orientador, ponte para a realização desse trabalho com toda sua desenvoltura e inteligência, um homem predestinado ao sucesso.

A todos os professores e funcionários do PPGCS, em especial a secretária Rosa Cláudia de Oliveira Santos, pela solicitude e educação com que sempre me tratou. E aos colegas que se tornaram amigos, Edjane, Ewerton, Kalline, Lilliane, Michael e Núbia pela força e incentivo nessa caminhada.

Aos meus amigos de vida, em especial Ariely, Cynthia, Gêl, Vânia e Vinícius pelo apoio que sempre me foi dado. Porque este parágrafo é dedicado a pessoa que mais me ajudou a chegar até aqui, Kaline da Silva Nascimento. Ela que caminhou comigo desde o ensino fundamental, me ajudou a vencer o médio, foi a primeira a saber da minha aprovação no vestibular e me auxiliou na universidade, também foi a que me deu forças nos estudos quando resolvi tentar pela primeira vez a seleção desse mestrado. Consolou-me quando o primeiro resultado desfavorável saiu; deu-me forças para tentar mais uma vez e comemorou junto a mim quando passei, acompanhou as etapas de angústia, me ajudou na preparação de seminários e do projeto... Não seria muito dizer que só cheguei até aqui porque pude contar com ela. Minha eterna dívida de gratidão!

Por fim, peço desculpas aos que não foram nomeados, aos personagens que agiram indiretamente, mas que trazem consigo igual importância e consideração. Meu muito obrigada a todos!

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE APÊNDICES	xi
LISTA DE FIGURAS	xii
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo geral.....	3
2.2 Objetivos específicos	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. A importância da cultura da cana-de-açúcar.....	4
3.2. Atributos físicos do solo	4
3.3. O uso da geoestatística em estudos de variabilidade espacial dos solos.....	6
3.4. A variabilidade espacial da produtividade da cana-de-açúcar	7
4. MATERIAL E MÉTODOS	8
4.1. Amostragem da área.....	10
4.2. Caracterização física do solo	11
4.2.1. Resistência a penetração.....	11
4.2.2. Umidade gravimétrica do solo.....	11
4.2.3. Análise granulométrica do solo	12
4.2.4. Densidade, microporosidade, macroporosidade e porosidade total do solo	12
4.2.5. Condutividade hidráulica saturada	12
4.2.6. Curva de retenção de água no solo	13
4.3. Análise geoestatística	13
4.3.1. Modelagem dos semivariogramas empíricos	13
4.3.2. Krigagem.....	14
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	14
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
APÊNDICES	33
REFERÊNCIAS	41

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Estatísticas descritivas dos dados de resistência do solo a penetração para as áreas de colheita manual; mecanizada; manual e mecanizada 155
- Tabela 2.** Estimativas dos parâmetros dos modelos dos semivariogramas ajustados de resistência do solo a penetração (Mpa) para as áreas de colheita manual; mecanizada; manual e mecanizada 177
- Tabela 3.** Umidade gravimétrica do solo para as áreas de colheita manual; mecanizada; manual e mecanizada 266
- Tabela 4.** Caracterização granulométrica, argila dispersa em água (argila natural), grau de floculação e classificação textural para as áreas de colheita manual; mecanizada; manual e mecanizada 277
- Tabela 5.** Valores de densidade do solo, densidade de partícula, macro e microporosidade e porosidade total para as áreas de colheita manual; mecanizada; manual e mecanizada 28
- Tabela 6.** Valores condutividade hidráulica para as áreas de colheita manual; mecanizada; manual e mecanizada 29
- Tabela 7.** Capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (AD) para as áreas de colheita manual; mecanizada; manual e mecanizada 300

LISTA DE APÊNDICES

- Apêndice 1A.** Semivariogramas da variável Resistência a penetração para a linha de plantio da área de colheita manual nas profundidades: (A) 0-10 cm, (B) 11-20 cm, (C) 21-30 cm, (D) 31-40 cm, (E) 41-50 cm e (F) 51-60 cm**344**
- Apêndice 2A.** Semivariogramas da variável Resistência a penetração para a entrelinha de plantio da área de colheita manual nas profundidades: (A) 0-10 cm, (B) 11-20 cm, (C) 21-30 cm, (D) 31-40 cm, (E) 41-50 cm e (F) 51-60 cm.....**355**
- Apêndice 3A.** Semivariogramas da variável Resistência a penetração para a linha de plantio da área de colheita mecanizada nas profundidades: (A) 0-10 cm, (B) 11-20 cm, (C) 21-30 cm, (D) 31-40 cm, (E) 41-50 cm e (F) 51-60 cm.....**366**
- Apêndice 4A.** Semivariogramas da variável Resistência a penetração para a entrelinha de plantio da área de colheita mecanizada nas profundidades: (A) 0-10 cm, (B) 11-20 cm, (C) 21-30 cm, (D) 31-40 cm, (E) 41-50 cm e (F) 51-60 cm.....**377**
- Apêndice 5A.** Semivariogramas da variável Resistência a penetração para a linha de plantio da área de colheita manual e mecanizada nas profundidades: (A) 0-10 cm, (B) 11-20 cm, (C) 21-30 cm, (D) 31-40 cm, (E) 41-50 cm e (F) 51-60 cm.....**388**
- Apêndice 6A.** Semivariogramas da variável Resistência a penetração para a entrelinha de plantio da área de colheita manual e mecanizada nas profundidades: (A) 0-10 cm, (B) 11-20 cm, (C) 21-30 cm, (D) 31-40 cm, (E) 41-50 cm e (F) 51-60 cm.....**39**
- Apêndice 7A.** Valores médios de química e fertilidade do solo para as áreas de colheita manual – segundo corte; mecanizada – segundo corte; manual e mecanizada.....**400**

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização das áreas de coletas contidas nas Fazendas Maria da Luz I e Santa Emília II.....	9
Figura 2. Amostras deformadas e indeformadas após coleta	9
Figura 3. Distribuição dos pontos de amostragem em malha regular	10
Figura 4. Área de colheita manual com destaque para uma das entrelinhas de plantio.....	100
Figura 5. Plano de amostragem usado para coleta nas áreas de colheita manual; mecanizada; manual e mecanizada.....	11
Figura 6. Krigagem da variável resistência do solo a penetração (RP) comparando dados de linha e entrelinha de plantio em diferentes profundidades (0 – 30 cm) para a área de colheita manual	200
Figura 7. Krigagem da variável resistência do solo a penetração (RP) comparando dados de linha e entrelinha de plantio em diferentes profundidades (31 – 60 cm) para a área de colheita manual	211
Figura 8. Krigagem da variável resistência do solo a penetração (RP) comparando dados de linha e entrelinha de plantio em diferentes profundidades (0 – 10 cm) para a área de colheita mecanizada	222
Figura 9. Krigagem da variável resistência do solo a penetração (RP) comparando dados de linha e entrelinha de plantio em diferentes profundidades (31 – 60 cm) para a área de colheita mecanizada	233
Figura 10. Krigagem da variável resistência do solo a penetração (RP) comparando dados de linha e entrelinha de plantio em diferentes profundidades (0 – 10 cm) para a área de colheita manual e mecanizada.....	244
Figura 11. Krigagem da variável resistência do solo a penetração (RP) comparando dados de linha e entrelinha de plantio em diferentes profundidades (31 – 60 cm) para a área de colheita manual e mecanizada.....	255

RESUMO

SOUZA, MÁIRA DA CUNHA. **Variabilidade espacial da resistência a penetração em solo sob diferentes condições de colheita de cana-de-açúcar**. Areia - PB, Centro de Ciências Agrárias, UFPB, agosto de 2017. 46 f. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Orientador: Prof. Dr. Flávio Pereira de Oliveira

Uma característica inerente aos solos é a heterogeneidade, todavia, cultivos, sobretudo os mecanizados, como o de cana-de-açúcar, tendem a ocasionar alterações que aumentam ainda mais a variabilidade nos atributos físicos do solo. Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi avaliar a variabilidade espacial da resistência a penetração em solo sob cultivo de cana-de-açúcar na microrregião do Litoral Norte paraibano. O estudo foi realizado em áreas de produção de cana-de-açúcar pertencentes à Usina Miriri e Bioenergia S/A. Duas áreas localizam-se na Fazenda Santa Emília II, município de Rio Tinto e a terceira faz parte da Fazenda Maria da Luz I, situada entre os municípios de Capim, Santa Rita e Sapé, estado da Paraíba. Na ordem de solo foram selecionadas três áreas com diferentes condições de uso: I. Colheita manual–segundo corte (CMA); II. Colheita mecanizada – segundo corte (CME) e III. Colheita manual e mecanizada (CMM). Em cada área de estudo foram coletadas amostras georreferenciadas nas linhas e entrelinhas de plantio, seguindo malha amostral regular de 20 x 20 m. As amostras foram analisadas no Laboratório de Física do Solo, do Departamento de Solo e Engenharia Rural (DSER), do Centro de Ciências Agrárias (CCA) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Para análise dos dados foi utilizada a estatística descritiva e a geoestatística. A média não foi suficiente para representar a distribuição espacial das áreas analisadas; a malha de amostragem foi adequada, dentro das limitações do estudo, pois permitiu captar a dependência espacial em praticamente todas as condições estudadas. A área de CMA apresentou os maiores valores de resistência a penetração (RP) dentre as três áreas. As áreas de CME e CMM seguiram padrão similar, apresentando baixa RP nas camadas mais superficiais e com valores crescentes nas profundidades maiores. Diferente da CMA, a CME e CMM obtiveram valores médios de RP maiores na entrelinha de plantio, o que pode ser explicado por ser a parte que mais sofre os efeitos da compactação impostas pelo intensivo tráfego de máquinas.

Palavras-chave: Compactação do solo; Tráfego controlado; Geoestatística

ABSTRACT

SOUZA, MAÍRA DA CUNHA. **Spatial variability of the resistance to penetration in soil under different sugarcane harvesting conditions.** Areia - PB, Centro de Ciências Agrárias, UFPB, August of 2017. 46 l. Dissertation. Graduation Program in Soil Science. Advisor: Prof. Dr. Flávio Pereira de Oliveira

An inherent characteristic of soils is its heterogeneity; however, plantings, especially the mechanized ones such as performed in the sugarcane crop, tend to cause changes that increase even more the variability in the physical attributes of the soil. Based on that, the objective of this study was to evaluate the spatial variability of the resistance to penetration in soil under sugarcane cultivation in the microregion of the northern coast of Paraíba. The study was performed in areas of sugarcane production belonging to the Miriri and Bioenergia S/A industries. Two areas are located in Fazenda Santa Emília II, municipality of Rio Tinto and the third is part of the Fazenda Maria da Luz I, located among the municipalities of Capim, Santa Rita and Sapé, in the state of Paraíba. In order of soil, three areas with different usage conditions were selected: I. Manual harvesting - Second Cut (CMA); II. Mechanized harvesting - second cut (CME) and III. Manual and mechanized harvesting (CMM). In each area of study, georeferenced samples were collected in the lines and between the lines of planting, following a regular sample mesh of 20 x 20 m. The samples were analyzed at the Laboratório de Física do Solo, of the Departamento de Solo e Engenharia Rural (DSER), belonging to the Centro de Ciências Agrárias (CCA) of the Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Descriptive statistics and geostatistics were used to analyze the data. The mean was not sufficient to represent the spatial distribution of the analyzed areas; The sampling soil mesh was adequate, within the limits of the study, since it allowed the capture of the spatial dependence in practically all the studied conditions. The CMA area presented the highest penetration resistance (RP) values among the three areas. The CME and CMM areas followed a similar pattern, presenting low RP in the superficial layers and with increasing values at the greater depths. Differently from CMA, the CME and CMM presented a higher mean of RP values in the inter-rows, which can be explained by the fact that it is the part that is mostly affected by the compaction imposed by the intensive traffic of the machines.

Key-words: Soil compaction; Controlled traffic; Geostatistics

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é um componente significativo na economia de muitos países, sendo considerada uma fonte importante de alimento e bioenergia (WACLAWOSKY et al., 2010). O Brasil se destaca como maior produtor mundial, aproximadamente 39% da produção, seguido pela Índia, Tailândia e Paquistão (FAO, 2014).

O Estado de São Paulo é responsável por 52% da área colhida de cana-de-açúcar destinada à atividade sucroalcooleira brasileira (CONAB, 2016). Dalchiavon et al. (2014) afirma que a cultura constitui-se da principal matéria prima para a fabricação do etanol usado como biocombustível, além da produção de açúcar, importante produto de exportação do Brasil.

Em relação a Paraíba, dados da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), demonstram que nos últimos dez anos o estado vem se mantendo como o terceiro maior produtor de cana-de-açúcar dentre os estados nordestinos, estando inferior apenas para Pernambuco e Alagoas. Na safra 2016/2017 a área plantada foi de 110,3 mil hectares, com produção de 4.856,1 mil toneladas (CONAB, 2017).

Na década de 1990, em busca de alternativas que assegurassem sua força de competitividade no mercado, o setor sucroenergético brasileiro passou a voltar sua atenção para custos de produção e incrementos tecnológicos. Foi nesta conjuntura que desenvolveu-se a utilização das colheitadeiras mecânicas nas lavouras de cana-de-açúcar no Brasil.

O sistema de colheita mecanizada da cana-de-açúcar tem como particularidade o uso de transbordos e colhedoras com massa total que varia de 20-30 toneladas (BRAUNACK et al., 2006). O tráfego desses maquinários é frequente ao longo dos vários ciclos da cultura, ocorrendo sob as mais diversas condições hídricas no solo, o que pode acarretar o aumento de compactação, o decréscimo da produtividade e/ou reduzir o ciclo produtivo da cultura. Assim, o acompanhamento e análise da qualidade física dos solos no decorrer do estágio de cultivo são estratégicos na concepção de sistemas de manejo que visem atenuar a degradação estrutural dos solos (CAVALIERI et al., 2011).

O tráfego frenético de máquinas nos sistemas agrícolas promove alterações, sobretudo, nos atributos físicos dos solos, tais como: porosidade, retenção de água, aeração e a resistência do solo à penetração de raízes. O que vem comprometendo o armazenamento e qualidade da água, alterando o crescimento e a produtividade da cultura, além de ocasionar o aumento dos processos erosivos (FREDDI et al., 2009).

Compreender e dimensionar os efeitos do uso e manejo do solo, torna-se essencial na edificação de sistemas agrícolas sustentáveis, a fim de conservar ou aprimorar a qualidade, evitando a degradação e visando o aumento da sua produtividade. Este desenvolvimento, aumenta a preocupação com os problemas pertinentes à compactação do solo, em virtude da intensidade de tráfego com máquinas de maior massa por eixo (SILVA e CABEDA, 2006).

Uma característica inerente aos solos é a heterogeneidade, todavia, cultivos, sobretudo os mecanizados, como o de cana-de-açúcar, tendem a ocasionar alterações que aumentam ainda mais a variabilidade nos seus atributos físicos (SANTOS et al., 2006). Em conformidade com Souza et al. (2009), a geoestatística é a ferramenta indicada para o estudo de atributos do solo que variam de acordo com o espaço, levando em conta suas características. Esta ferramenta possibilita uma visão com base na dependência espacial dos dados, o que permite a elaboração de informações e mapas que irão evidenciar a distribuição desses atributos no campo, fornecendo subsídios para o manejo adequado do solo.

O aumento da produtividade da cultura, a partir da adoção de menor espaçamento entre os sulcos de plantio vem em contraponto com os agravos consequentes da maior compactação do solo. Assim, uma hipótese a ser levantada no presente estudo é que a adoção do tráfego controlado não altera os atributos físicos na linha de plantio.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a variabilidade espacial da resistência a penetração em solo sob cultivo de cana-de-açúcar na microrregião do Litoral Norte paraibano.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar atributos físicos, tais como granulometria, densidade, porosidade, retenção de água, condutividade hidráulica;
- Comparar os atributos sob as condições de linha e entrelinha de plantio;
- Comparar a compactação do solo sob cultivo manual de cana-de-açúcar, com segundo corte mecanizado sob tráfego controlado e com os dois tipos de cultivo (manual e mecanizado);
- Avaliar e identificar a autocorrelação espacial da resistência a penetração em variografia;
- Caracterizar as distribuições espaciais da resistência a penetração na linha e entrelinha de plantio.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. A importância da cultura da cana-de-açúcar

Nos últimos anos, a cana-de-açúcar foi uma das culturas que mais cresceu no Brasil, fazendo o país se destacar como produtor, consumidor e exportador (SCHULTZ et al., 2014; SOUZA et al., 2014; SATOLO e BACCHI, 2009). Estima-se que nas últimas safras brasileiras, 52% da produção destinou-se à produção de etanol e 48% à de açúcar (ABDALA e RIBEIRO, 2011).

O agronegócio da cana-de-açúcar é um dos setores que mais gera empregos no Brasil, que é responsável por cerca US\$ 20 bilhões/ano (CONAB, 2016). De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2012) dentre os principais produtos das exportações agrícolas brasileiras, o setor sucroenergético só ficou atrás para a cultura da soja.

O financiamento com baixas taxas de juros e o desenvolvimento de cultivares adaptadas às condições naturais nas mais diversas regiões, aliados à demanda mundial por etanol, contribuíram para a ampliação da cana-de-açúcar, segundo Gonçalves et al. (2014). De acordo com Aleixo et al. (2014), a partir da ampliação da produtividade e sustentabilidade nas áreas atualmente plantadas, naturalmente impulsionadas pelo aumento do consumo de seus derivados, a competitividade do setor sucroenergético pode aumentar ainda mais.

O interesse global em energia renovável e as perspectivas de crescimento para a indústria da cana-de-açúcar impulsionam o setor a investir no aumento da sustentabilidade na produção através de meios tecnológicos (SILVA e FERNANDES, 2014). Para tanto, torna-se imprescindível, estudos que viabilizem o crescimento da produtividade, a redução dos custos e dos impactos ambientais, uma vez que práticas de manejo adequadas são indispensáveis para a manutenção e expansão das áreas plantadas (RODRIGUES, 2014).

3.2. Atributos físicos do solo

A qualidade física do solo é essencial para a sustentabilidade agrícola. O conhecimento de atributos físicos do solo é fundamental para explicar fenômenos pertinentes ao meio e à produtividade das culturas (TORMENA e FIDALSKI, 2007).

O estudo da qualidade dos atributos físicos do solo expressa vantagens

associadas ao baixo custo, métodos simples e rápidos, e relação direta com os atributos químicos e biológicos (MENDES et al., 2006). As propriedades físicas do solo referentes ao rendimento das culturas estão relacionadas com o desenvolvimento das plantas, com a disponibilidade de água e oxigênio, temperatura ideal e, também, com a textura e a agregação, que interferem na retenção de água e difusão de oxigênio (SILVA e NOGUEIRA JÚNIOR, 2001).

Da perspectiva de manejo do solo, o cultivo da cana-de-açúcar é considerado uma das práticas mais agressivas, visto que um número vasto de operações com máquinas são realizadas repetidamente durante as diferentes etapas da produção (CASTRO et al., 2013). Conforme Souza et al. (2005) o uso intensivo do solo e do maquinário sem respeito ao grau de umidade adequado no manejo, a queima dos restos vegetais e a predominância do preparo superficial excessivo modificam expressivamente as propriedades físicas do solo.

A resistência do solo à penetração constitui uma das variáveis físicas para avaliação de sua qualidade, podendo apresentar grande variabilidade espacial (CARVALHO et al., 2008). É um dos atributos mais indicados para os estudos de compactação do solo. A alta resistência mecânica do solo à penetração pode limitar o crescimento das raízes e, conseqüentemente, o desenvolvimento e produtividade da planta (REICHERT et al., 2009).

Outra variável importante é a porosidade. A intensificação da mecanização nas diversas fases da produção de cana-de-açúcar tem forte impacto sobre o solo, diminuindo a porosidade do mesmo (GREGO et al., 2010). O aumento da densidade do solo provoca a redução da porosidade total, da macroporosidade, da condutividade hidráulica e aumento da microporosidade e da resistência do solo à penetração das raízes (CHIODEROLI et al., 2012). A densidade do solo é considerado um fator importante em estudos agrícolas, devido à sua estreita relação com a água e com o armazenamento de oxigênio (PARIZ et al., 2011).

Para um planejamento correto do uso e manejo da área agrícola é essencial que se conheça a variabilidade espacial da granulometria do solo. Camargo et al. (2010), afirmam que em frações de tamanho de partículas do solo, a variabilidade influencia de forma direta no escoamento superficial e movimento da água, capacidade de troca de cátions (CTC) e retenção de água e nutrientes. Dessa forma, os autores concluem que áreas com declividade alta, geralmente, apresentam correlação dos fatores granulométricos do solo com a produtividade das culturas.

A condutividade hidráulica do solo é uma propriedade que evidencia a facilidade com que a água nele se movimenta, apresentando importância eminente para a produção das culturas e preservação do ambiente (GONÇALVES e LIBARDI, 2013). A condutividade hidráulica saturada é o atributo que apresenta a maior variabilidade, por sua forte dependência da forma e continuidade do sistema poroso, com altos valores de coeficiente de variação e com baixa correlação aos outros atributos físicos do solo (ORJUELA-MATTA et al., 2011).

A compactação, uma das principais responsáveis pela degradação dos solos, é resultado do aumento da densidade do solo e da resistência à penetração (BORDIN et al., 2005).

Pesquisas realizadas para avaliação da qualidade física do solo, além de extremamente importantes, são amplamente difundidas na literatura mundial (VASCONCELOS et al., 2014). Isso se dá, em virtude das metodologias de baixo custo e das induções na produtividade das culturas e na sustentabilidade dos agroecossistemas (CARDOSO et al., 2013).

3.3. O uso da geoestatística em estudos de variabilidade espacial dos solos

A análise geoestatística é utilizada para observar a distribuição e o padrão espacial das variáveis avaliadas, estabelecendo modelos de semivariograma teóricos que demonstram a autocorrelação da característica estudada em direções e distâncias de separação diferentes (RODRIGUES, 2014). A partir de modelos matemáticos, os valores de dados em locais que não foram obtidas amostras em campo podem ser estimados através de interpolação por krigagem ordinária (DALE et al., 2002). De acordo com Aquino et al. (2012), a krigagem ordinária vale-se de um estimador de interpolação linear imparcial e com mínima variância, garantindo uma estimativa mais precisa dos dados; consiste no método de interpolação mais usual em geoestatística (PEREIRA et al., 2013). A interpolação é um método que possibilita, a partir de um conjunto discreto de dados pontuais conhecidos, a criação de novos dados em locais não amostrados, considerando que os pontos que estão mais próximos espacialmente tendem a apresentar valores mais parecidos do que pontos afastados.

Os solos não se formam de maneira homogênea, nem em termos de tempo, nem de espaço, isto posto, pode-se inferir que muitos atributos não variam

ao acaso, contudo apresentam dependência espacial e/ou temporal (BERNER et al., 2007). Segundo Vieira et al. (2002) a geoestatística tornou-se uma poderosa ferramenta de análise dos atributos do solo, pois permite que a variabilidade espacial do solos seja facilmente analisada.

A utilização da geoestatística tem como objetivo avaliar a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e, conseqüentemente, o rendimento das culturas também (LIMA et al., 2009). Diversas pesquisas vêm evidenciando a relação da variabilidade espacial da produtividade da cana-de-açúcar com alguns atributos físicos do solo, tais como estabilidade de agregados e granulometria (SOUZA et al., 2009), da fertilidade e da resistência à penetração (GREGO et al., 2010); da porosidade, da resistência à penetração e da umidade do solo (CAMARGO et al., 2010). Em conformidade com Martins et al. (2011), a utilização de ferramentas de análise geoestatística, através de métodos adequados, na determinação da variabilidade dos atributos, propicia o estabelecimento de distâncias ideais para a coleta de amostras, o que leva a uma conseqüente redução dos custos de amostragem.

Os resultados obtidos através da análise geoestatística serão dependentes da densidade e do formato da grade de amostragem adotada; o método de interpolação empregado, a qualidade do ajuste do semivariograma na estimativa em dos dados em locais não amostrados e a variabilidade local definirão a precisão dos mapas gerados (CORÁ e BERALDO, 2006). Para Queiroz et al. (2011), caracterizar a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo, associando a outros métodos estatísticos de tomada de decisão, pode gerar contribuição positiva em uma agricultura que seja ao mesmo tempo econômica e sustentável.

3.4. A variabilidade espacial da produtividade da cana-de-açúcar

Haja vista que pequenas alterações nos atributos do solo podem levar a grandes diferenças de produtividade, é imprescindível entender a variabilidade espacial das propriedades que controlam o rendimento das culturas (SILVA e LIMA, 2012). A modernização e mecanização do cultivo da cana-de-açúcar provocou modificações nas propriedades físicas do solo e, por conseguinte, no desempenho da cultura (SOUZA et al., 2009). Para Guedes Filho et al. (2010), analisar os mapas de produtividade de forma espacial e temporal possibilita compreender os principais fatores que a afetam, levando a busca de informações sobre as variações

espaciais, bem como suas causas.

Os mapas de produtividade fornecem parâmetros que levam a identificar e corrigir as causas de baixos rendimentos em determinadas áreas e buscar entender a razão do alto rendimento em outras (SPEZIA et al., 2012). Para um sistema de agricultura de precisão realmente eficaz, mapas de produtividade exercem fundamental importância, visto que concebem a informação da resposta da cultura para adequadas estratégias de manejo (MOLIN et al., 2012).

Ao estudarem a influência do relevo na variabilidade espacial dos atributos do solo na produtividade da cana-de-açúcar, Souza et al. (2010), constataram que a variabilidade da produção foi melhor elucidada quando os atributos foram relacionados a topografia e que a maior variabilidade se deu na parte mais baixa do talhão. Delalibera et al. (2012) chegaram à conclusão de que os fatores extrínsecos, a exemplo da fertilidade do solo e granulometria possuem variabilidade grande. Segundo Morales et al. (2010) o manejo da cana-de-açúcar envolve um processo periódico de coleta e análise de dados que levam a otimização na tomada de decisão, por isso a aplicação de técnicas de variabilidade espacial dependem da escala de campo e rentabilidade.

4. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em áreas de produção de cana-de-açúcar pertencentes à Usina Miriri e Bioenergia S/A. Duas áreas localizam-se na Fazenda Santa Emília II, município de Rio Tinto e a terceira faz parte da Fazenda Maria da Luz I, situada entre os municípios de Capim, Santa Rita e Sapé, estado da Paraíba (Figura 1).

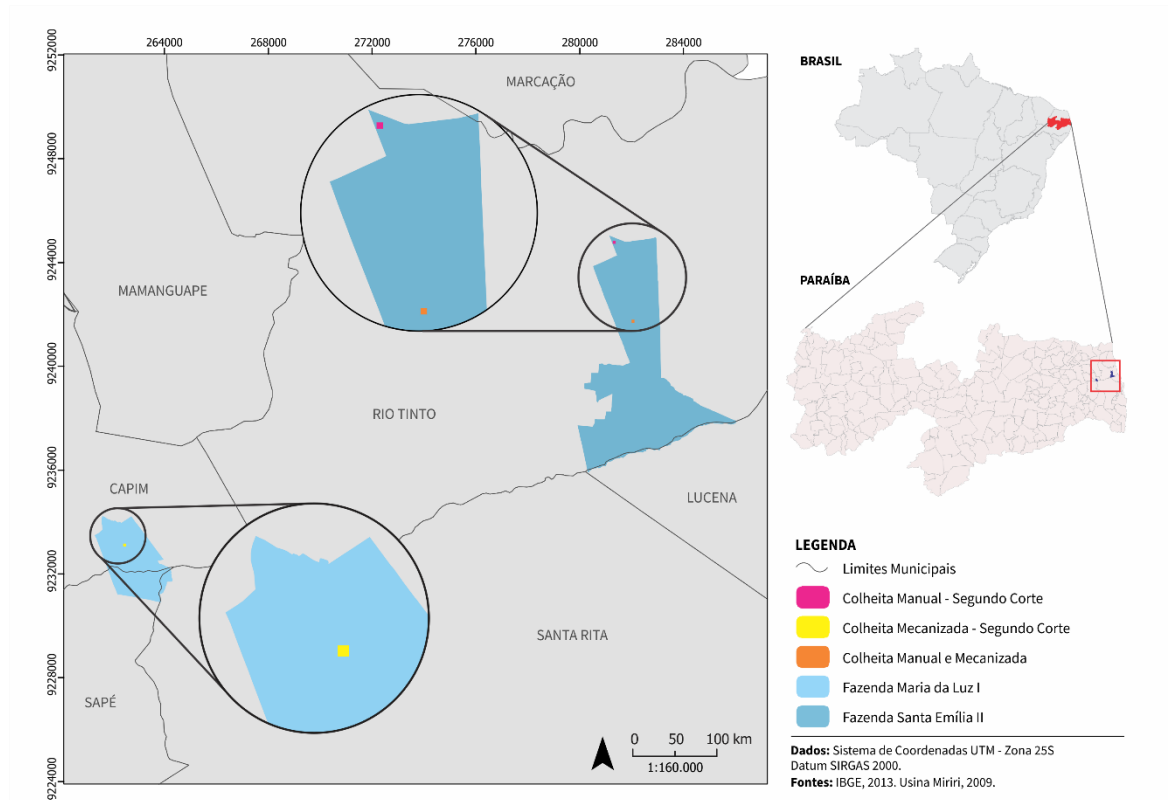


Figura 1. Localização das áreas de coletas contidas nas Fazendas Maria da Luz I e Santa Emília II

As áreas estão inseridas na mesorregião da Mata Paraibana e na microrregião do Litoral Norte, responsáveis pela maior produção de cana-de-açúcar do estado. O solo das três áreas foi classificado como Argissolo Acinzentado.

As amostras de solos indeformadas foram coletadas utilizando-se amostrador de Uhland em anéis volumétricos com 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura. As amostras deformadas foram armazenadas em sacos plásticos (Figura 2).



Figura 2. Amostras deformadas e indeformadas após coleta.

As amostras foram analisadas no Laboratório de Física do Solo, do Departamento de Solo e Engenharia Rural (DSER), do Centro de Ciências Agrárias

(CCA) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

4.1. Amostragem da área

O perímetro das áreas selecionadas foi obtido através de levantamento com receptor de navegação da marca Garmin, modelo GPSMAP® 76CSx. Para amostragem foram adotadas malhas regulares no espaçamento 20 x 20 m em áreas de 100 x 100 m, e os pontos localizados nos cruzamentos das malhas foram georreferenciados (Figura 3).

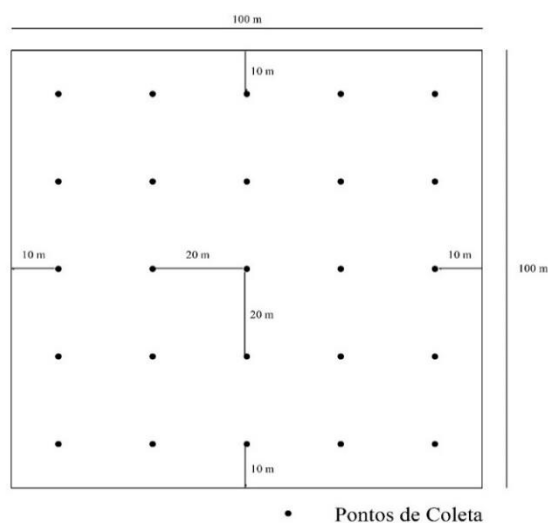


Figura 3. Distribuição dos pontos de amostragem em malha regular

Em cada ponto foram coletadas amostras de solo indeformadas e deformadas na entrelinha e na linha de plantio (Figura 4).



Figura 4. Área de colheita manual com destaque para uma das entrelinhas de plantio
Por se tratar de um talhão sistematizado, a distância entre entrelinha e linha mais próxima foi de 1,2 m. Foram coletadas 25 amostras para cada condição:

entrelinha nas profundidades de 0 – 10 e 10 – 20 cm; linha nas profundidades de 0 – 10 e 10 – 20 cm.

Na ordem de solo foram selecionadas três áreas com diferentes condições de uso: I. Colheita manual–segundo corte; II. Colheita mecanizada – segundo corte e III. Colheita manual e mecanizada (Figura 5).

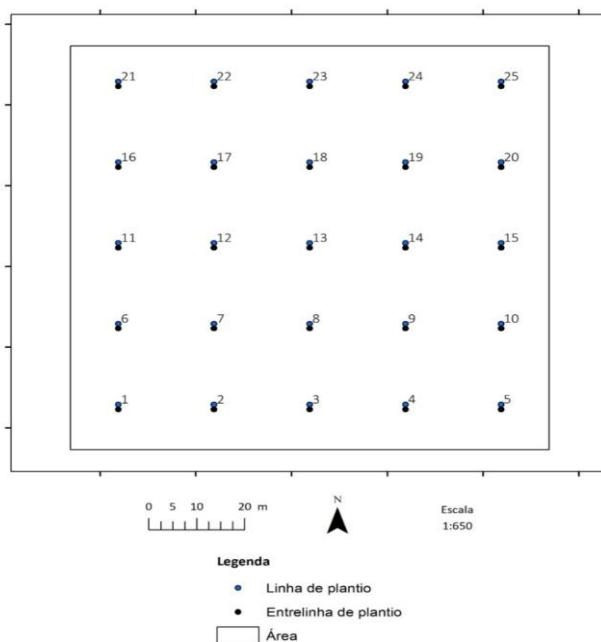


Figura 5. Plano de amostragem usado para coleta nas áreas de colheita manual; mecanizada; manual e mecanizada

4.2. Caracterização física do solo

4.2.1. Resistência a penetração

A determinação da resistência a penetração foi realizada em cada ponto amostral, até 60 cm de profundidade, a partir de um penetrômetro de impacto modelo Stolf. O equipamento constitui-se de um peso (4 kg), responsável por provocar o impacto no solo, além de uma haste e um cone para a penetração no solo. Foram registradas a quantidade de impactos e a penetração (metros) que a haste obteve nas camadas de solo, posteriormente os valores de resistência a penetração foram convertidos em unidades de Mpa.

4.2.2. Umidade gravimétrica do solo

Em cada área selecionou-se uma linha e uma entrelinha para a abertura de pequenas trincheiras que permitissem a coletas de solos nas profundidades de 0 –

10, 11 – 20, 21 – 30, 31 – 40, 41 – 50, 51 – 60 cm, totalizando 36 amostras que foram utilizadas para obter a umidade gravimétrica do solo no momento da coleta e correlacionar com as medidas de resistência a penetração.

4.2.3. Análise granulométrica do solo

A análise granulométrica dos solos amostrados foi realizada pela distribuição de diâmetro de partículas primárias, conforme o método do Densímetro (Hidrômetro de Bouyoucos) (DONAGEMA et al., 2011), usando hidróxido de sódio (NaOH-1N) como agente dispersante mais agitação mecânica. Por se tratar de uma variável que apresenta pouca variação, foram geradas amostras compostas para cada linha e entrelinha das áreas.

Para a determinação da argila dispersa em água foi utilizado o mesmo procedimento da determinação da argila total, porém, sem o uso do dispersante químico. A partir dos dados calculou-se o grau de floculação.

4.2.4. Densidade, microporosidade, macroporosidade e porosidade total do solo

No laboratório, as amostras foram saturadas com água destilada, por um período de 48 horas, e colocadas sob uma tensão de -6 kPa em mesa de tensão. Após estabilização do peso na mesa, as amostras foram secas em estufa, a 105° C, até peso constante. De posse dos pesos saturado, seco e após equilíbrio a -6 kPa, determinou-se a densidade do solo, a microporosidade e porosidade total, a macroporosidade foi calculada por diferença, de acordo com a Donagema et al. (2011).

4.2.5. Condutividade hidráulica saturada

Para a determinação da condutividade hidráulica saturada utilizou-se o permeâmetro de carga constante (DONAGEMA et al., 2011). As amostras foram saturadas em água destilada por 24 horas, em seguida transferidas para o permeâmetro onde foi aplicada uma carga hidráulica constante de 2 cm e registrada em unidades de minutos alternados o volume de água percolado, até uniformidade em pelo menos três leituras.

O cálculo foi realizado utilizando a equação (1):

$$K = \frac{Q \times L}{A \times H \times t} \quad (1)$$

Onde: K = condutividade hidráulica (cm h⁻¹); Q = volume do percolado (mL), ou seja, o valor da última leitura quando não há variação entre os valores anteriores, ou a média das duas leituras quando há alguma variação; L = altura do bloco do solo (cm); H = altura do bloco do solo e da coluna (cm); A = área do cilindro (cm²); t = tempo (h).

4.2.6. Disponibilidade total de água no solo

Foram determinados os principais pontos da curva de retenção na mesa de tensão (0,006 MPa) e no conjunto aparelho extrator de Richards (0,01; 0,033 e 1,5 MPa) contendo duas câmaras modelos 1600 (5 Bar Plate Extractor) e 1500 (15 Bar Plate Extractor) e compressor Soilmoisture modelo 505 20 Bar Compressor, conforme Donagema et al. (2011). A partir dos valores da capacidade de campo (0,01 Mpa) e do ponto de murcha permanente (1,5 Mpa) foi possível determinar a disponibilidade total de água no solo.

4.3. Análise geoestatística

Antes da realização da análise geoestatística, o conjunto de dados da resistência do solo a penetração foi caracterizado e resumido através de estatística descritiva tendo sido calculados: menor valor, maior valor, média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação, coeficiente de assimetria e curtose.

A análise geoestatística foi realizada em duas etapas no *software* Surfer® 13. Na primeira, por meio de semivariogramas empíricos, foi avaliada a dependência espacial para a variável, em cada profundidade de linha e entrelinha de plantio. A segunda etapa, procedeu com a interpolação pelo método de krigagem, nos casos onde a dependência espacial foi encontrada.

4.3.1. Modelagem dos semivariogramas empíricos

Os modelos teóricos dos semivariogramas empíricos foram ajustados de forma iterativa e por inspeção visual. O semivariograma utilizado foi o omnidirecional, pois a malha amostral adotada não permitiu a construção de semivariogramas direcionais por não atingir o número mínimo de pares de pontos. Dessa forma essa análise desconsiderou o modelo anisotrópico, limitando-se ao

isotrópico.

Nessa etapa definiu-se o número de *lags* utilizados para agrupar os pares de pontos, que de acordo com Andriotti (2003) deve ser no mínimo 30 pares para uma maior confiabilidade dos resultados. Para escolha do tamanho do *lag* utilizou-se a metade da maior distância de separação entre os pares de pontos, que para o estudo foi de aproximadamente 60 m.

De acordo com os parâmetros [efeito pepita (C_0), contribuição (C_1) e patamar (C_0+C_1)] de cada modelo escolhido (foram testados os modelos esférico, exponencial e gaussiano) pode-se calcular o índice de dependência espacial [$C_1/(C_0+C_1) * 100$] em porcentagem proposto por Zimback (2001).

4.3.2. Krigagem

A última etapa consistiu da aplicação do método de interpolação geoestatístico da krigagem ordinária. A partir da detecção de dependência espacial e da adoção dos modelos teóricos ajustados para cada variável, foram gerados os mapas de isolinhas para cada área e suas respectivas profundidades. Para as áreas que não apresentaram dependência espacial foi aplicado o método IDW (interpolação ponderada pelo inverso da distância).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na análise estatística descritiva da resistência do solo a penetração (RP) (Tabela 1), é possível observar que os valores das medidas de tendência central (média e mediana) são relativamente semelhantes para todas as áreas e profundidades estudadas. Para a área de colheita manual (CMA) a média é sempre maior que a mediana tanto para a linha, como para a entrelinha de plantio, exceto para a profundidade 51 – 60 cm da entrelinha. A mesma situação foi encontrada apenas para todas as profundidades da linha de plantio da área de colheita mecanizada (CME). Isso pode ser explicado pelo fato da média ser uma medida sensível a valores extremos, que possuem uma distribuição mais assimétrica a direita, conforme indica os sinais positivos para os coeficientes de assimetria (C_a).

Com base no índice de classificação do coeficiente de variação (CV) sugerido por Warrick e Nielsen (1980): baixo – $CV < 12\%$; médio – $12\% < CV < 60\%$; alto – $CV \geq 60\%$. Verificou-se que exceto para as profundidades 0 - 10 e 10 - 20 cm da linha de plantio e 0 - 10 cm da entrelinha para a área de CMA que

obtiveram CV altos, o que indica uma alta variação dos dados em relação à média, as demais áreas e respectivas profundidades obtiveram CV médios.

Na área de CMA observa-se uma redução do CV de acordo com o aumento da profundidade analisada, o que de acordo com Cancian (2015) pode ser relacionado com a maior interferência do mecanismo sulcador das semeadoras nas camadas superficiais, causando maior desestruturação e consequente heterogeneidade dos solos em superfície. Além dos constantes ciclos de umedecimento e secagem e atividade biológica que também são fenômenos que atingem diretamente as camadas mais superficiais dos solos. Para a área de colheita manual e mecanizada (CMM) e a de CME os coeficientes de variação não seguiram o mesmo padrão decrescente da área de CMA.

Através dos coeficientes de assimetria e curtose é possível perceber que nem todos os dados seguem distribuição normal. Porém de acordo com Cressie (1991) isso não é um pré-requisito fundamental quando se trabalha com interpolação por krigagem. Houve predominância do coeficiente de assimetria positivo, indicando tendência de maior quantidade de valores menores que a média.

Tabela 1. Estatísticas descritivas dos dados de resistência do solo a penetração para as áreas de colheita manual; mecanizada; manual e mecanizada

Prof ⁽¹⁾ cm	n ⁽²⁾	Mín ⁽³⁾	\bar{X} ⁽⁴⁾	Me ⁽⁵⁾	Máx ⁽⁶⁾	S ⁽⁷⁾	CV (%) ⁽⁸⁾	Ca ⁽⁹⁾	Cc ⁽¹⁰⁾
-----Mpa-----									
Colheita manual									
Linha de plantio									
0 - 10	25	0,26	1,43	1,13	5,09	1,19	82,77	1,63	5,08
11 - 20	25	1,07	3,17	2,45	9,48	2,38	75,04	1,28	3,57
21 - 30	25	1,22	3,76	3,00	8,83	2,01	53,41	0,91	2,91
31 - 40	25	1,83	4,06	3,19	9,26	1,92	47,16	1,07	3,32
41 - 50	25	1,65	3,95	3,66	7,29	1,63	41,38	0,51	2,09
51 - 60	25	1,65	3,85	3,77	7,29	1,52	39,39	0,34	2,27
Entrelinha de plantio									
0 - 10	25	0,26	1,32	1,01	5,24	1,15	87,53	2,24	7,61
11 - 20	25	0,98	2,46	2,32	4,94	1,23	50,27	0,38	1,94
21 - 30	25	1,35	2,83	2,67	5,38	1,13	39,83	0,77	2,82
31 - 40	25	1,24	2,64	2,38	4,58	0,81	30,72	0,93	3,20
41 - 50	25	1,28	2,38	2,14	5,09	0,82	34,64	1,65	6,01
51 - 60	25	1,39	2,68	2,72	4,21	0,86	32,19	0,18	2,03
Colheita mecanizada									
Linha de plantio									
0 - 10	25	0,26	0,34	0,26	0,69	0,12	33,74	1,29	4,43
11 - 20	25	0,53	1,13	1,02	1,97	0,35	31,21	0,63	3,00
21 - 30	25	0,80	1,59	1,57	3,19	0,45	28,50	1,56	7,63
31 - 40	25	0,61	1,43	1,42	2,16	0,33	23,29	0,10	3,52
41 - 50	25	0,55	1,16	1,13	1,87	0,30	26,25	0,28	3,04
51 - 60	25	0,61	1,15	1,13	2,31	0,40	34,69	0,91	3,91

Entrelinha de plantio									
0 - 10	25	0,52	1,01	1,13	1,57	0,24	24,12	0,02	2,82
11 - 20	25	1,34	2,16	2,14	2,63	0,31	14,50	-0,77	3,36
21 - 30	25	1,79	2,25	2,23	2,97	0,33	14,63	0,51	2,20
31 - 40	25	1,15	1,67	1,68	2,16	0,28	16,86	0,17	2,21
41 - 50	25	0,80	1,22	1,24	1,57	0,22	17,81	-0,26	2,01
51 - 60	25	0,69	1,17	1,18	1,72	0,27	23,17	0,25	2,27
Colheita manual e mecanizada									
Linha de plantio									
0 - 10	25	0,26	0,31	0,26	0,50	0,08	25,48	1,32	3,40
11 - 20	25	0,26	0,65	0,65	1,12	0,20	31,39	0,23	2,88
21 - 30	25	0,26	0,98	1,04	1,57	0,34	34,77	0,06	2,46
31 - 40	25	0,63	1,05	1,03	1,57	0,28	26,71	0,33	2,10
41 - 50	25	0,65	1,01	0,99	1,68	0,26	25,67	0,76	3,12
51 - 60	25	0,42	0,91	0,85	1,87	0,26	28,64	1,85	8,63
Entrelinha de plantio									
0 - 10	25	0,26	0,62	0,59	1,28	0,23	36,57	1,32	4,99
11 - 20	25	0,82	1,35	1,39	2,09	0,32	23,68	0,21	2,68
21 - 30	25	1,21	1,74	1,76	2,45	0,28	16,37	0,13	3,02
31 - 40	25	1,06	1,69	1,72	2,60	0,31	18,50	0,63	4,50
41 - 50	25	0,83	1,37	1,40	1,72	0,21	15,47	-0,81	3,15
51 - 60	25	0,63	1,02	1,06	1,35	0,19	18,23	-0,41	2,37

(¹) intervalo de profundidades; (²) número de amostras; (³) menor valor; (⁴) média; (⁵) mediana; (⁶) maior valor; (⁷) desvio padrão; (⁸) coeficiente de variação; (⁹) coeficiente de assimetria; (¹⁰) coeficiente de curtose

Para a CMA, na linha e entrelinha de plantio, em todas as profundidades, observa-se uma amplitude nos valores encontrados maior que nas demais áreas. Essa amplitude destaca mais uma vez a importância do estudo geoestatístico, pois adotar a média de observações pode levar a erros nas formas de manejo a ser realizado.

Na Tabela 2, estão apresentados os resultados dos parâmetros geoestatísticos obtidos. Através do ajuste dos semivariogramas, pôde-se verificar que a maior parte das variáveis analisadas apresentaram dependência espacial, exceto as profundidades de 0-10 e 41-50 da CMM, evidenciando o chamado efeito pepita puro para essas condições, ou seja, a malha amostral não foi eficiente para detectar dependência espacial.

No estudo do modelo isotrópico pode-se considerar que a malha de amostragem foi adequada, pois permitiu a detecção de dependência espacial, porém vale ressaltar que para se analisar tendência e anisotropia, o número amostral não é suficiente.

Quanto aos modelos teóricos testados, o mais utilizado para modelar a dependência espacial foi o esférico (trinta e dois), seguido do exponencial (quatro). Lima et al. (2010) ao estudar a variabilidade espacial de atributos químicos do solo

em um Argissolo Vermelho-Amarelo também considerou o modelo esférico como o que melhor se ajustou aos semivariogramas.

De acordo com o índice de dependência espacial (IDE) proposto por Zimback (2001), a predominância para as áreas em questão foi de dependência espacial forte (>75%). Apenas as profundidades 11-20 cm da linha de plantio da CME, 11-20 cm da linha de plantio e 41-50 cm da entrelinha da CMM apresentaram dependência espacial moderada (25 a 75%). Assim, pode-se dizer que para 94% das variáveis o semivariograma explica bem a variância espacial dos dados.

Os valores do alcance constituem de um resultado importante para a idealização de planos de amostragem, pois indicam a linha divisória entre a aplicação da Estatística Clássica, que em distâncias maiores que o alcance pode ser utilizada sem restrições, por pressupor aleatoriedade dos dados ou da Geoestatística, que correlaciona as amostras em distâncias menores que o alcance podendo utilizá-las para interpolação em locais não amostrados (VIEIRA, 2000).

A Tabela 2 resume os modelos teóricos ajustados aos semivariogramas empíricos omnidirecionais, porém nos Apêndices 1A, 2A, 3A, 4A, 5A e 6A são apresentado todos os gráficos.

Tabela 2. Estimativas dos parâmetros dos modelos dos semivariogramas ajustados de resistência do solo a penetração (Mpa) para as áreas de colheita manual; mecanizada; manual e mecanizada

Prof ⁽¹⁾	C ₀ ⁽²⁾	C ₀ + C ₁ ⁽³⁾	Alcance (m)	Modelo	IDE (%) ⁽⁴⁾
Colheita manual					
Linha de plantio					
0 - 10	0,2	1,22	43	Esférico	84
11 - 20	0,5	5,00	41	Esférico	90
21 - 30	0,4	4,00	40	Esférico	90
31 - 40	0,5	3,60	41	Esférico	86
41 - 50	0,5	2,75	35	Esférico	82
51 - 60	0,5	3,21	40	Exponencial	84
Entrelinha de plantio					
0 - 10	0,2	1,07	43	Esférico	81
11 - 20	0,2	1,53	35	Esférico	87
21 - 30	0,2	1,25	38	Esférico	84
31 - 40	0,1	0,60	45	Esférico	83
41 - 50	0,1	0,60	28	Esférico	83
51 - 60	0,04	0,74	31	Esférico	95
Colheita mecanizada					
Linha de plantio					
0 - 10	0,002	0,0155	29	Esférico	87
11 - 20	0,04	0,14	46	Esférico	71
21 - 30	0,05	0,243	25	Esférico	79
31 - 40	0,01	0,102	28	Esférico	90
41 - 50	0,012	0,109	30	Exponencial	89

51 - 60	0,02	0,146	27	Esférico	86
Entrelinha de plantio					
0 - 10	0,0105	0,0704	27	Esférico	85
11 - 20	0,02	0,133	40	Esférico	85
21 - 30	0,0158	0,1188	29	Esférico	87
31 - 40	0,01	0,079	27	Esférico	87
41 - 50	0,005	0,047	27	Esférico	89
51 - 60	0,0113	0,0883	25	Esférico	87
Colheita manual e mecanizada					
Linha de plantio					
0 - 10	-	-	-	EPP*	-
11 - 20	0,02	0,044	35	Exponencial	55
21 - 30	0,003	0,114	39	Esférico	97
31 - 40	0,0056	0,0856	31	Esférico	93
41 - 50	-	-	-	EPP*	-
51 - 60	0,01	0,065	32	Esférico	85
Entrelinha de plantio					
0 - 10	0,0045	0,0695	30	Exponencial	94
11 - 20	0,01	0,115	49	Esférico	91
21 - 30	0,0033	0,0781	46	Esférico	96
31 - 40	0,02	0,095	45	Esférico	79
41 - 50	0,015	0,047	40	Esférico	68
51 - 60	0,005	0,0427	39	Esférico	88

(¹) intervalo de profundidades (cm); (²) Efeito pepita; (³) Patamar; (⁴) Índice de dependência espacial; *Efeito pepita puro

Os mapas apresentados nas Figuras 6, 7, 8, 9, 10 e 11 consistem do produto final da krigagem. Essa superfície interpolada apresenta a distribuição espacial de cada variável, comparando a RP na linha e entrelinha de plantio em suas respectivas profundidades. Assim se torna possível identificar a localização e a abrangência de valores extremos, o grau de homogeneidade da área e as direções de maior gradiente.

A área de CMA apresentou os maiores valores de RP dentre as três áreas. De acordo com Vepraskas (1994) quando os valores de RP ficam acima de 2 Mpa, o crescimento radicular é considerado limitante para a maioria das culturas, de acordo com Otto et al. (2011), até mesmo para a cana-de-açúcar. Porém, de uma forma geral, não se encontra na literatura uma padronização quanto o valor limitante de RP para a cana-de-açúcar. Gonçalves et al. (2014) encontraram o valor de 2,5 MPa, enquanto Cavalieri et al. (2011) utilizaram 3,0 MPa. Vale ressaltar que, a resistência do solo a penetração exercida pela haste tem tendências a superestimação, pois não necessariamente representa a resistência que as raízes imprimem (VAN LIER e GUBIANI, 2015).

As áreas de CME e CMM seguiram padrão similar, apresentando baixa RP nas camadas mais superficiais (0 – 30 cm) e com valores crescentes nas profundidades maiores. Os maiores valores nas camadas subsuperficiais podem

ser explicados pelo manejo adotado no cultivo. O uso contínuo de arado e grade para o preparo do solo resolve o problema de compactação em superfície, porém a transfere para as camadas da subsuperfície, que de acordo com Silva (1992) são chamadas de “pé-de-arado” ou “pé-de-grade. Para a descompactação dessas áreas faz-se necessário o uso constante da operação de subsolagem.

Diferente da CMA, a CME e CMM obtiveram valores médios de RP maiores na entrelinha de plantio, o que pode ser explicado por ser a parte que mais sofre os efeitos da compactação impostas pelo intensivo tráfego de máquinas. Enquanto a CMA apresentou ápices de valores médios na casa de 4,06 Mpa que podem ser considerados limitantes ao crescimento radicular, segundo Otto et al. (2011). Os valores médios para as demais áreas obtiveram padrão satisfatório.

Com as distribuições espaciais da RP para as áreas estudadas e seus respectivos valores de média (Figuras 6, 7, 8, 9, 10 e 11), é possível perceber que partes consideráveis ficam acima ou abaixo desse valor, o que leva a constatação de que adotar a média para representar toda a área não é adequado. É importante frisar que para cada área se trabalhou com os dados de linha e entrelinha isoladamente. Além de mostrar as diferenças estruturais existentes entre essas partes, causados pelos impactos de compactação que resulta do frequente tráfego de máquinas agrícolas sobretudo nas entrelinhas de plantio, quis se mostrar a importância da distribuição das amostras nas áreas de estudo de forma a considerar suas características, visto que as técnicas geoestatísticas baseiam-se na hipótese de que medições separadas por distâncias pequenas são mais semelhantes entre si do que aquelas separadas por distâncias maiores. Considerar o efeito isolado de linhas ou entrelinhas de plantio pode levar a interpretações tendenciosas, como observado nos mapas gerados.

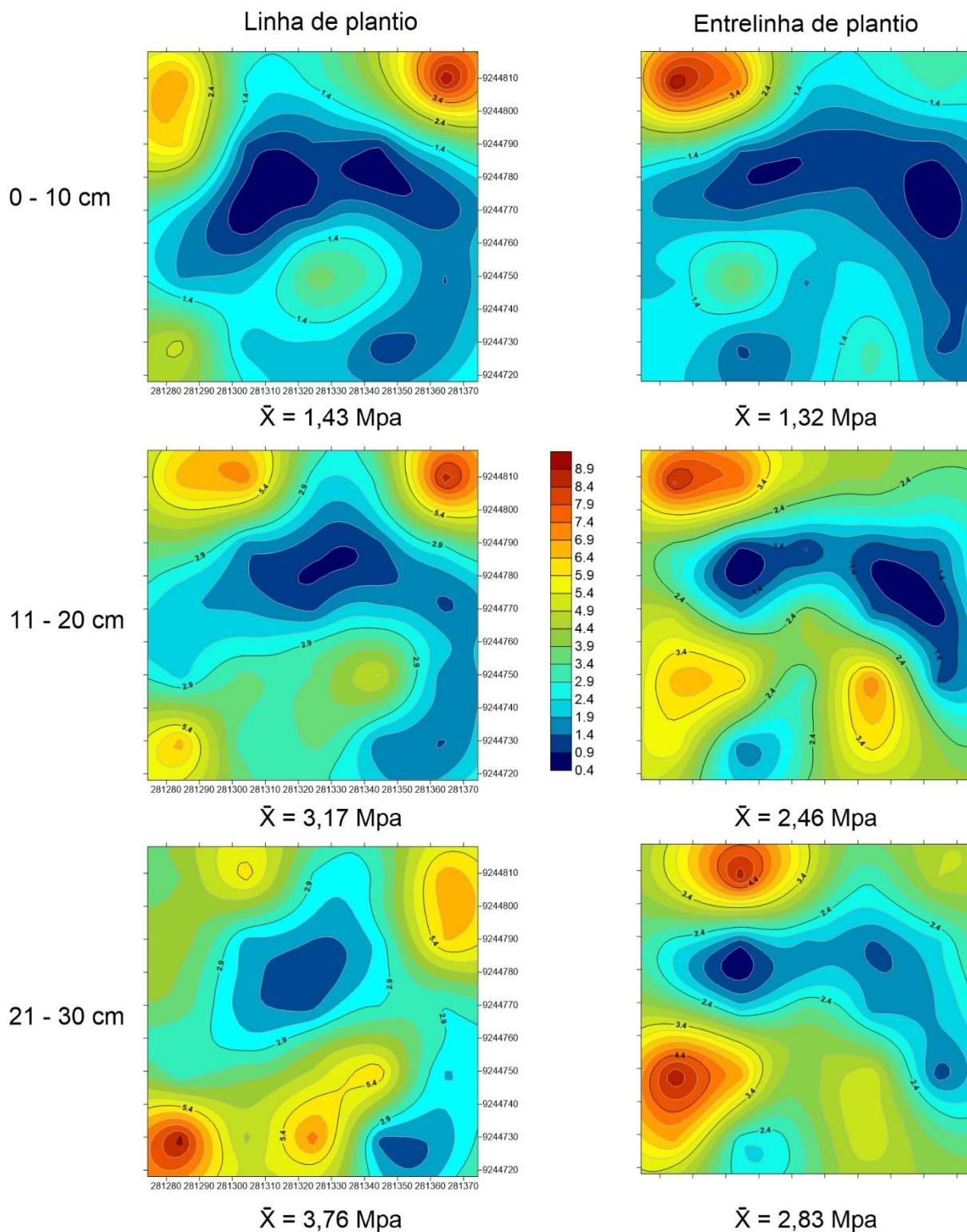


Figura 6. Krigagem da variável resistência do solo a penetração (RP) comparando dados de linha e entrelinha de plantio em diferentes profundidades (0 – 30 cm) para a área de colheita manual

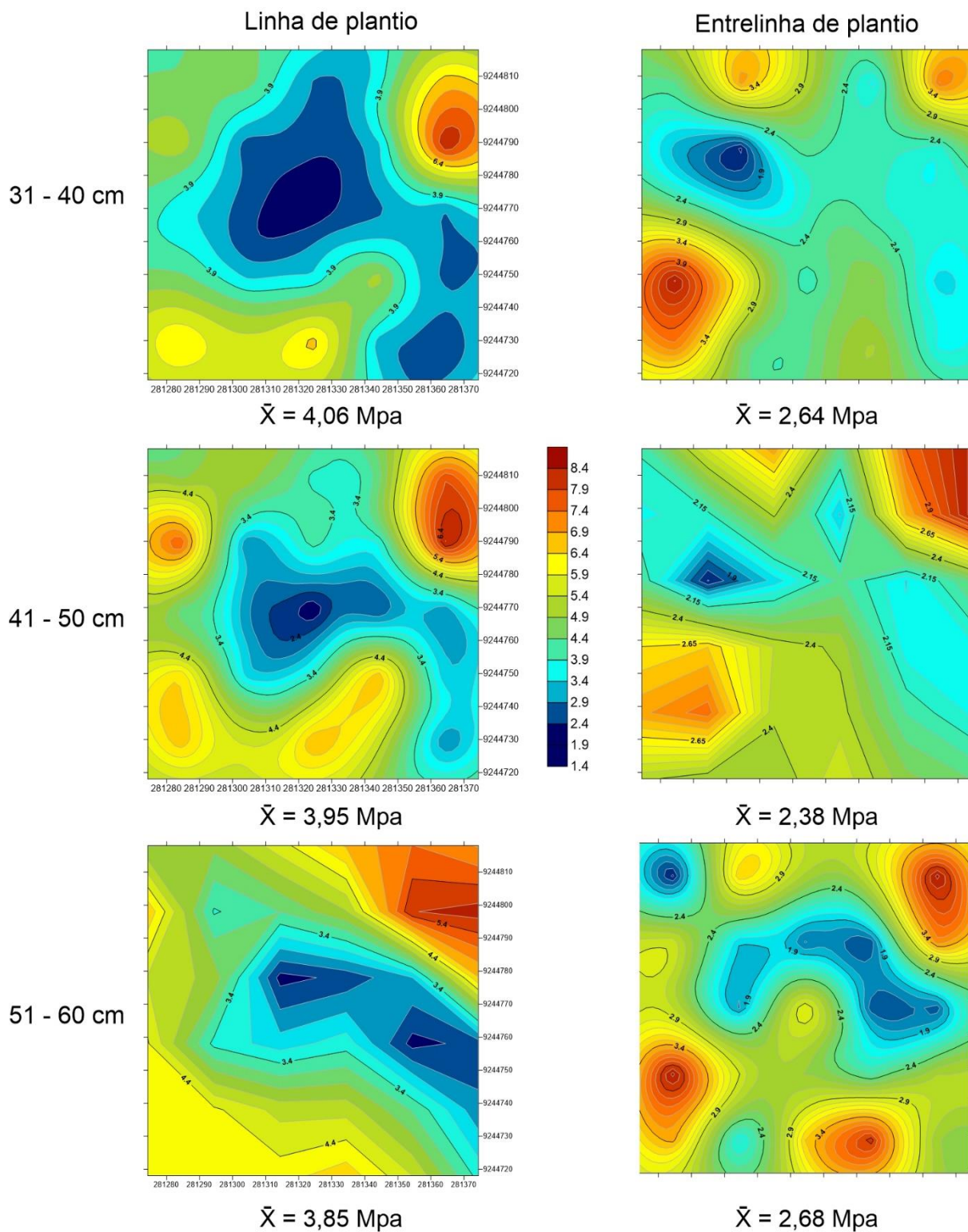


Figura 7. Krigagem da variável resistência do solo a penetração (RP) comparando dados de linha e entrelinha de plantio em diferentes profundidades (31 – 60 cm) para a área de colheita manual

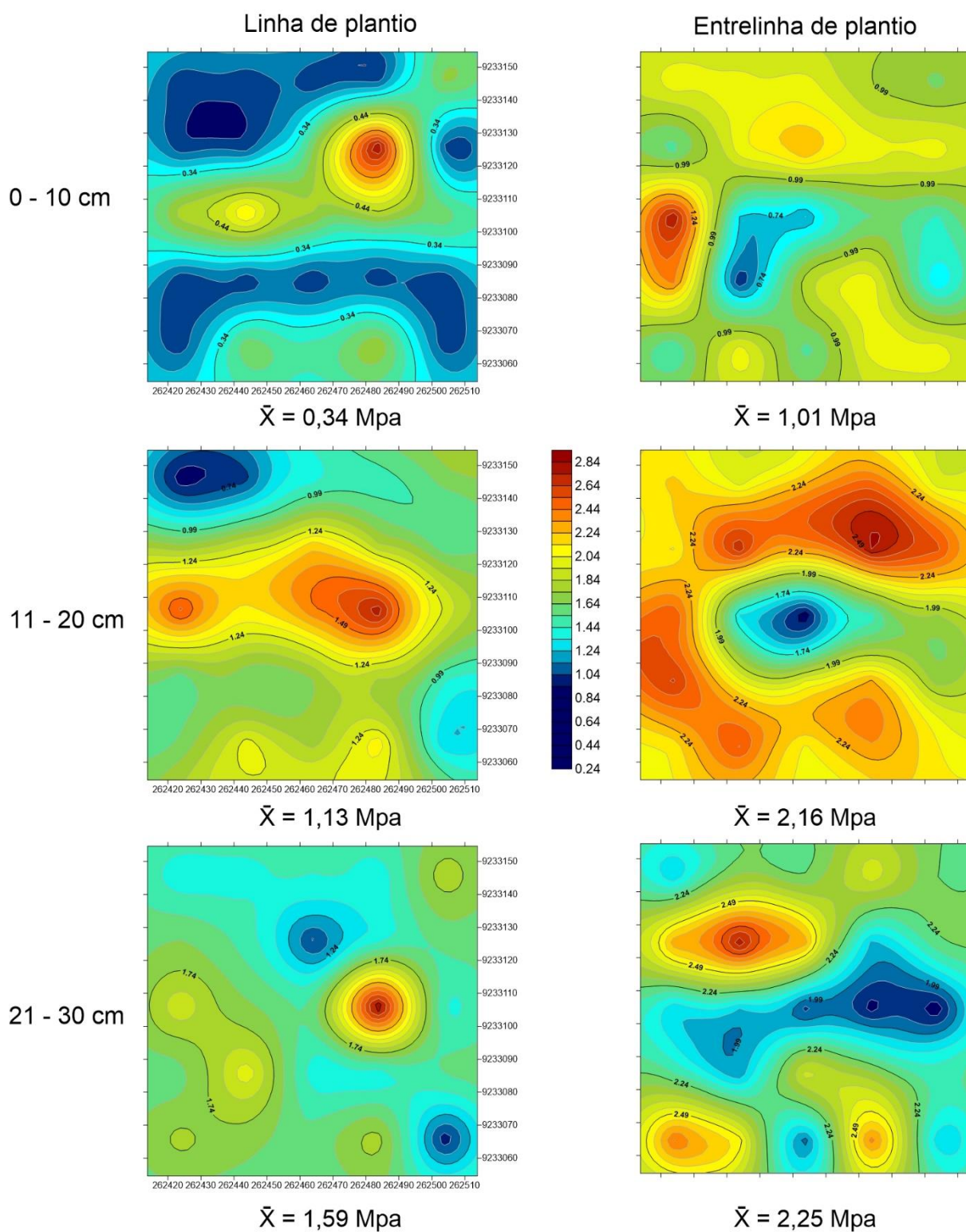


Figura 8. Krigagem da variável resistência do solo a penetração (RP) comparando dados de linha e entrelinha de plantio em diferentes profundidades (0 – 10 cm) para a área de colheita mecanizada

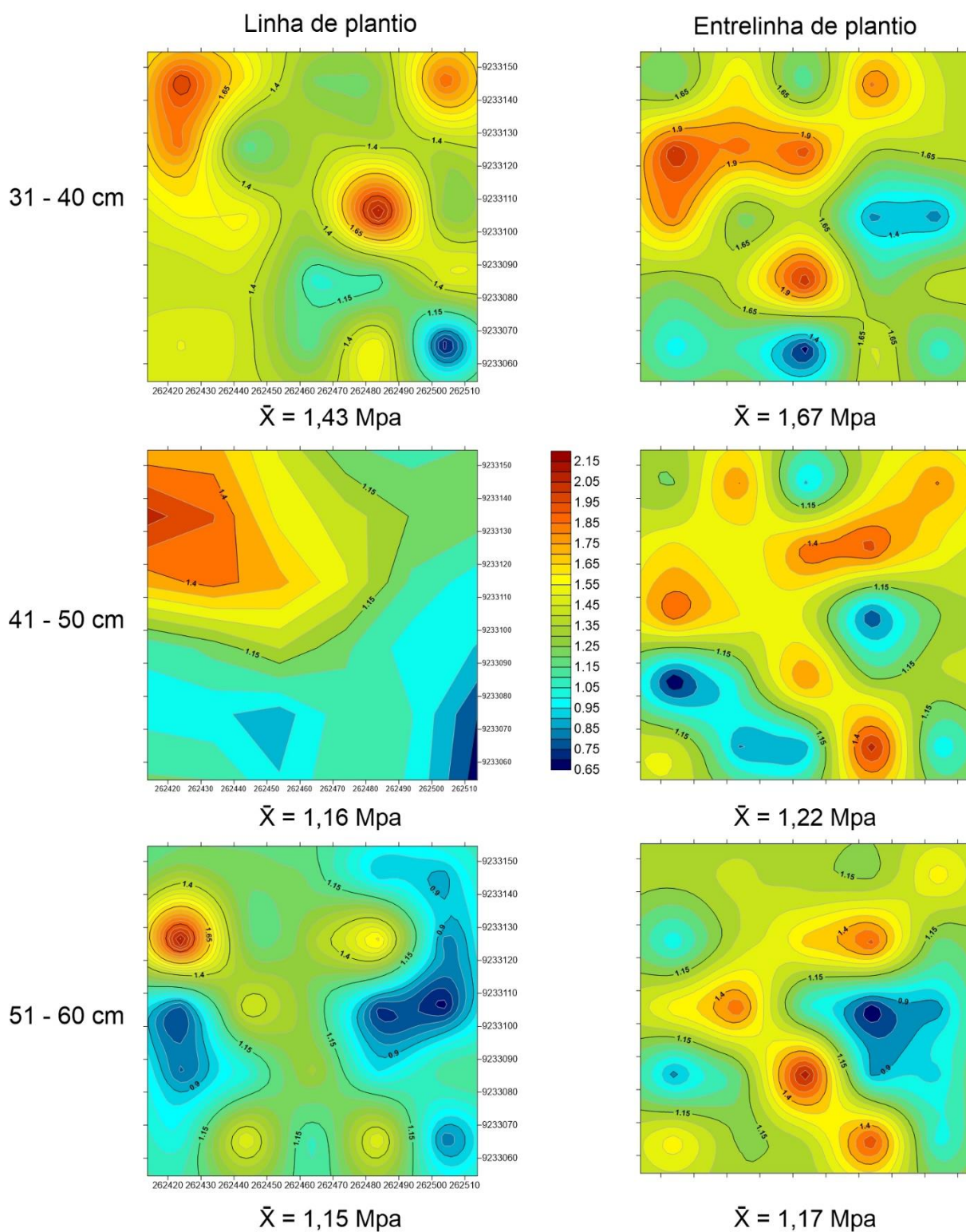


Figura 9. Krigagem da variável resistência do solo a penetração (RP) comparando dados de linha e entrelinha de plantio em diferentes profundidades (31 – 60 cm) para a área de colheita mecanizada

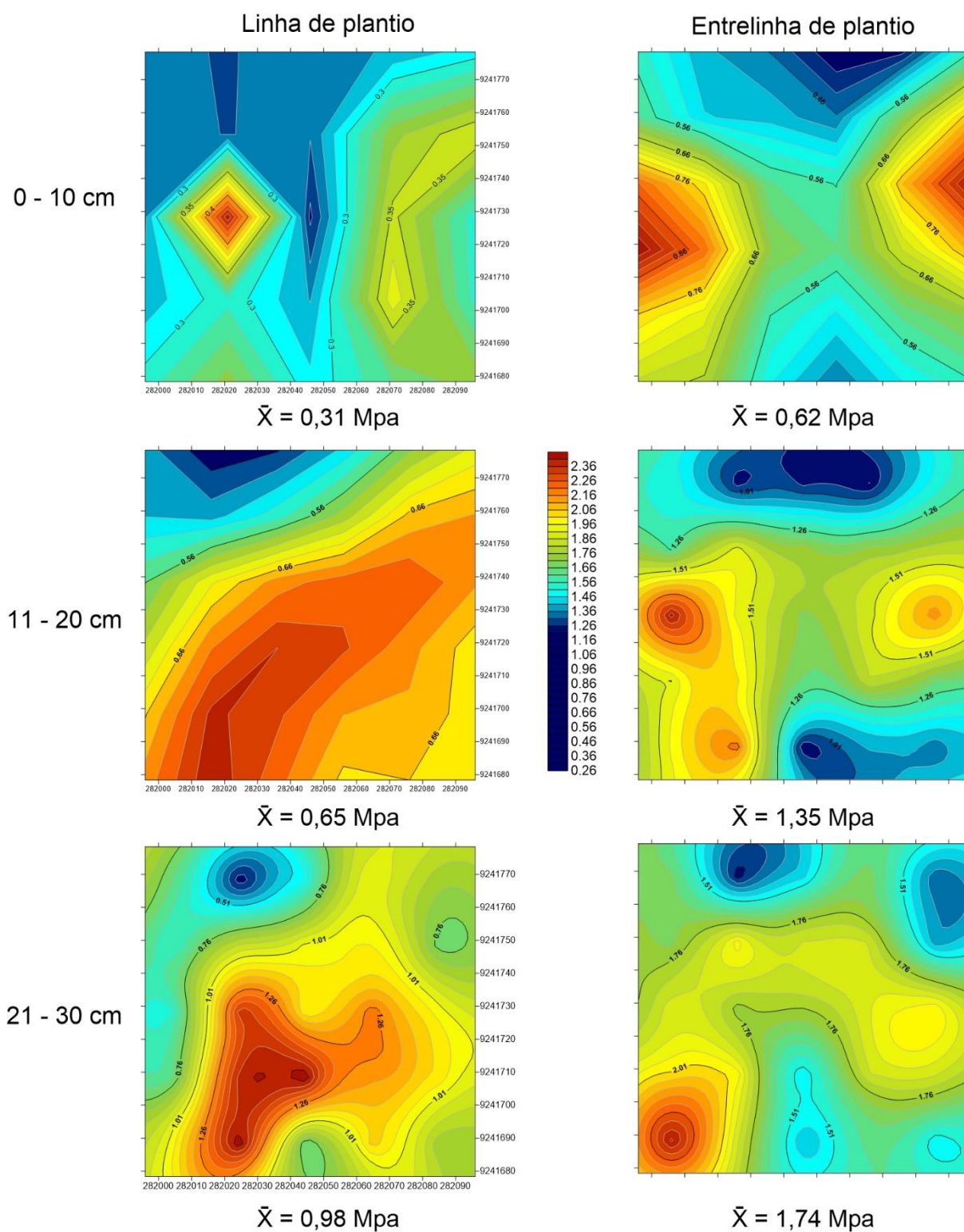


Figura 10. Krigagem da variável resistência do solo a penetração (RP) comparando dados de linha e entrelinha de plantio em diferentes profundidades (0 – 10 cm) para a área de colheita manual e mecanizada

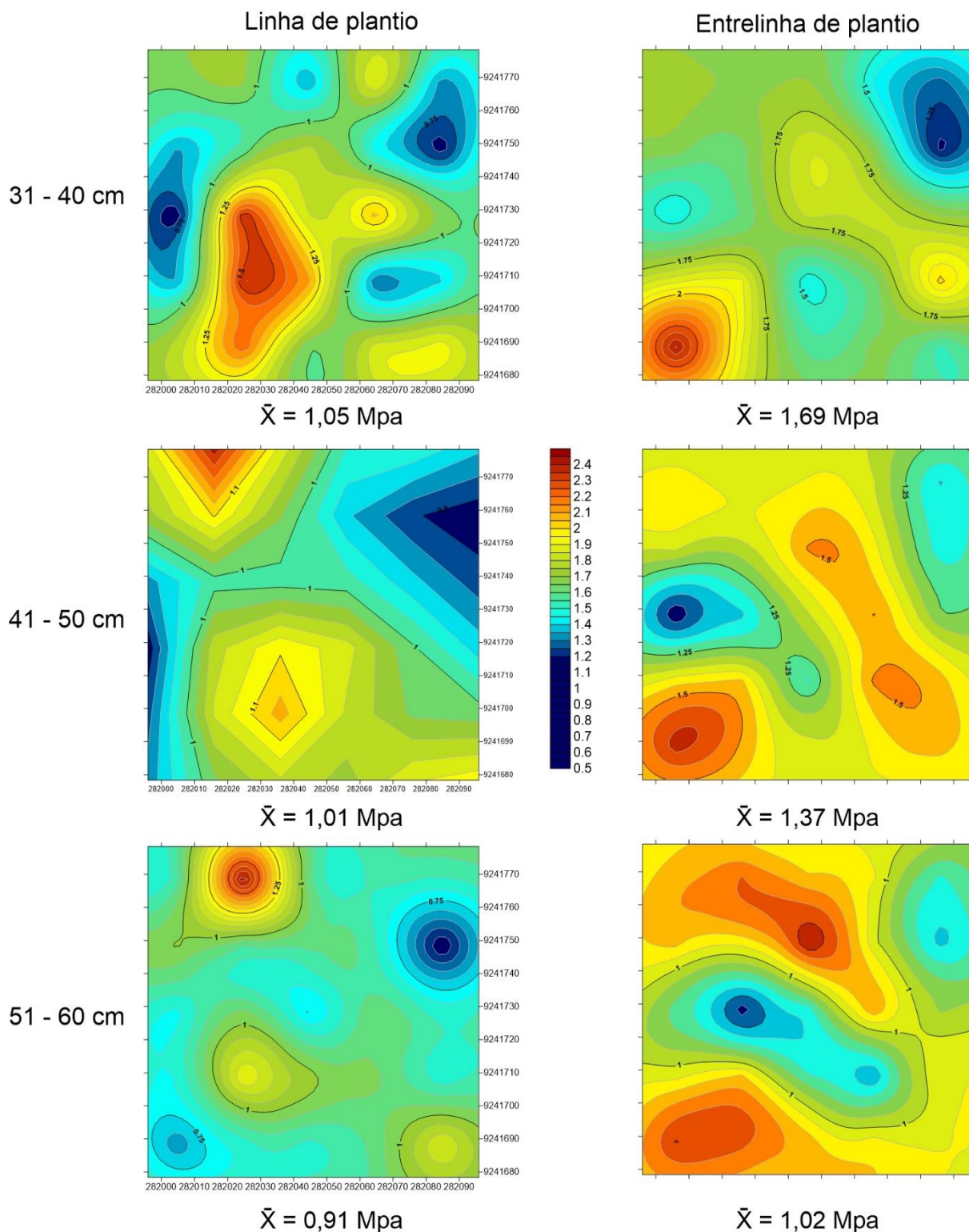


Figura 11. Krigagem da variável resistência do solo a penetração (RP) comparando dados de linha e entrelinha de plantio em diferentes profundidades (31 – 60 cm) para a área de colheita manual e mecanizada

A partir da Tabela 3 podemos comparar os valores de umidade gravimétrica do solo no período da coleta. Observa-se que a CMA obteve os menores valores, variando de 0,02 a 0,04 kg kg⁻¹, correlacionando esses dados aos altos valores encontrados de RP para essa área, o resultado corrobora com os encontrados por

Carvalho Filho et al. (2004), segundo os autores, a RP tende a variar inversamente ao conteúdo de água no solo, ou seja, quanto menor a umidade, maior a resistência do solo a penetração.

Para a área de CME os maiores valores de umidade, tanto para linha, como para a entrelinha de plantio foram encontrados nas camadas que vão de 41 a 60 cm, demonstrando um maior conteúdo de água em profundidade, que pode aferir sobre a boa percolação no perfil do solo. Para essa área o índice de RP atinge seu ponto máximo na camada de 31 – 40 cm e tem uma leve queda nas camadas seguintes, o que mais uma vez comprova a relação entre umidade e RP. A variação entre CME e CMM foi bem pequena, demonstrando maiores semelhanças entre as duas áreas.

Tabela 3. Umidade gravimétrica do solo para as áreas de colheita manual; mecanizada; manual e mecanizada

Profundidade (cm)	Linha de plantio	Entrelinha de plantio
	Umidade Gravimétrica ----- kg kg ⁻¹ -----	
Colheita manual		
0 - 10	0,02	0,02
11 - 20	0,02	0,02
21 - 30	0,02	0,03
31 - 40	0,03	0,04
41 - 50	0,04	0,04
51 - 60	0,04	0,04
Colheita mecanizada		
0 - 10	0,07	0,07
11 - 20	0,07	0,08
21 - 30	0,09	0,09
31 - 40	0,11	0,11
41 - 50	0,12	0,13
51 - 60	0,13	0,14
Colheita manual e mecanizada		
0 - 10	0,08	0,11
11 - 20	0,08	0,10
21 - 30	0,07	0,10
31 - 40	0,08	0,11
41 - 50	0,08	0,10
51 - 60	0,08	0,10

Um atributo importante para embasar melhor os resultados obtidos na análise de RP é a textura do solo. De maneira geral, as três áreas apresentaram um alto teor de areia, limitando-se as classificações de Arenosa e Areia Franca (Tabela 4). De acordo com Sene et al. (1985) em solos de textura arenosa os valores críticos de resistência a penetração variam de 6 a 7 MPa. Assim, pode-se

considerar que de acordo com a natureza textural dos solos estudados, os valores obtidos para RP não são considerados críticos, ou seja, não interferem negativamente no desenvolvimento do sistema radicular.

As amostras dos solos apresentaram baixo valor de argila natural, o que acarretou em valores altos grau de floculação (GF) para as três áreas. Tanto as análises de argila natural como o grau de floculação fornecem subsídios para determinar se o solo está sujeito à erosão. Quanto maior o grau de floculação do solo menor a tendência a erosão e desagregação.

Tabela 4. Caracterização granulométrica, argila dispersa em água (argila natural), grau de floculação e classificação textural para as áreas de colheita manual; mecanizada; manual e mecanizada

Profundidade (cm)	Granulometria			Argila Natural	Classe Textural	Grau de Floculação %
	Areia	Silte	Argila			
-----g kg ⁻¹ -----						
Colheita manual						
Linha de plantio						
0 - 10	884	55	61	0	Areia Franca	100
10 - 20	878	51	71	0	Areia Franca	100
Entrelinha de plantio						
0 - 10	896	57	47	0	Arenosa	100
10 - 20	899	49	52	8	Arenosa	84,6
Colheita mecanizada						
Linha de plantio						
0 - 10	865	44	91	0	Areia Franca	100
10 - 20	847	40	113	0	Areia Franca	100
Entrelinha de plantio						
0 - 10	864	59	77	0	Areia Franca	100
10 - 20	864	43	93	5	Areia Franca	94,6
Colheita manual e mecanizada						
Linha de plantio						
0 - 10	899	32	68	0	Arenosa	100
10 - 20	888	25	87	0	Areia Franca	100
Entrelinha de plantio						
0 - 10	901	32	67	0	Arenosa	100
10 - 20	903	32	65	0	Arenosa	100

Para todas as áreas estudadas, os valores de densidade do solo (DS) aumentaram de acordo com a profundidade (Tabela 5). Para a densidade de partículas (DP), o processo foi similar, menos para as entrelinhas da CME e CMM.

Com exceção da profundidade de 0 – 10 da entrelinha de plantio da CMA, os valores de DS foram maiores nas entrelinhas. Esses valores entram em concordância com os resultados obtidos para RP, visto que a DS é um atributo importante nos estudos de compactação e seu aumento também está associado ao maior tráfego de máquinas agrícolas. De acordo com Viana et al. (2011), diferente da DS a densidade de partículas (DP) é um atributo mais estável, assim as alterações no uso e manejo do solo não interferem em seu comportamento.

Os menores valores de DS são encontrados em superfície, pois de acordo com Centurion (2007), o teor de matéria orgânica (MO) influencia e tende a ser maior nessas camadas, o que foi constatado na análise de química e fertilidade (Apêndice 7A). Solos arenosos apresentam menor volume de poros, por isso apresentam DS maior que os argilosos, assim vale ressaltar a importância de se conhecer sobre a textura e outras variáveis que possam interferir na interpretação dos resultados. Segundo Reichert et al. (2003), em solos arenosos uma DS considerada crítica para o desenvolvimento do sistema radicular das plantas está acima de $1,75 \text{ g/cm}^3$, portanto as densidades encontradas estão dentro de um padrão aceitável para a natureza granulométrica do solo.

A porosidade total (PT) obteve médias parecidas para as áreas de CMA e CMM, variando de 0,45 a 0,48 m^3/m^3 , para a área de CME essa porosidade foi um pouco menor variando entre 0,35 a 0,39 m^3/m^3 , vale ressaltar que os maiores valores de DS foram observados na CME, mostrando que esses atributos são inversamente proporcionais. Os valores de macro (Ma) e microporosidade (Mi) não tiveram grande variação em profundidade. Porém para todas as áreas em estudo os valores de Ma foram maiores que os de Mi. Esses resultados são similares aos expostos por Cavalieri et al. (2009), que afirma que o frequente tráfego de máquinas agrícolas aumenta consideravelmente a densidade do solo, reduzindo a Ma, responsável pela percolação de água no solo e conseqüentemente aumentando a Mi e a capacidade de retenção de água, características inerentes a compactação.

Tabela 5. Valores de densidade do solo, densidade de partícula, macro e microporosidade e porosidade total para as áreas de colheita manual; mecanizada; manual e mecanizada

Profundidade cm	Densidade		Porosidade		
	Solo g cm ⁻³	Partícula	Macro	Micro	Total
Colheita manual					
Linha de plantio					
0 - 10	1,36	2,58	0,19	0,28	0,47
10 - 20	1,39	2,61	0,19	0,28	0,47
Entrelinha de plantio					
0 - 10	1,34	2,56	0,19	0,28	0,47
10 - 20	1,42	2,59	0,18	0,27	0,45
Colheita mecanizada					
Linha de plantio					
0 - 10	1,43	2,30	0,06	0,31	0,37
10 - 20	1,56	2,57	0,08	0,31	0,39
Entrelinha de plantio					
0 - 10	1,63	2,60	0,08	0,29	0,37
10 - 20	1,66	2,59	0,07	0,28	0,35
Colheita manual e mecanizada					
Linha de plantio					
0 - 10	1,31	2,53	0,12	0,36	0,48
10 - 20	1,37	2,59	0,11	0,36	0,47
Entrelinha de plantio					
0 - 10	1,42	2,60	0,11	0,34	0,45
10 - 20	1,46	2,57	0,10	0,33	0,43

Para condutividade hidráulica (K), observou-se que os valores foram menores com o aumento da profundidade e que em todas as áreas os maiores valores de K foram obtidos na linha de plantio (Tabela 6). Das três áreas, a CME foi a que apresentou os menores valores de K, em contrapartida, como já discutido, foi a que obteve os maiores valores de DS. Mezacasa et al. (2015) observaram uma forte tendência da diminuição de K de acordo com o aumento da DS, bem como ampliação de K conforme a Ma se eleva, o que aconteceu similarmente para as áreas em estudo.

A textura é outro forte indicador de K, de acordo com Freire et al. (2003), solos mais arenosos possuem maior condutividade em comparação aos mais argilosos. Essa afirmação está em acordo com os dados obtidos nesse estudo, visto que os menores teores de argila foram encontrados para a área de CME.

De forma geral, pode-se dizer que quanto maior a resistência a penetração, maior a densidade do solo, menor a macroporosidade e condutividade hidráulica.

Tabela 6. Valores condutividade hidráulica para as áreas de colheita manual; mecanizada; manual e mecanizada

Profundidade (cm)	Linha de plantio	Entrelinha de plantio
----- cm h ⁻¹ -----		
Colheita manual		
0 - 10	55,99	46,20
11 - 20	49,86	40,27
Colheita mecanizada		
0 - 10	31,45	18,22
11 - 20	17,64	10,74
Colheita manual e mecanizada		
0 - 10	40,65	31,83
11 - 20	35,28	29,72

Na Tabela 7 é possível observar que os valores de capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (AD) não variaram ou não apresentaram variação considerável entre as profundidades. O PMP apresentou valores bem próximos aos da CC, o que refletiu diretamente nos baixos valores para AD.

Tabela 7. Capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (AD) para as áreas de colheita manual; mecanizada; manual e mecanizada

Profundidade (cm)	Capacidade de Campo	Ponto de Murcha Permanente	Água Disponível
----- m ³ m ⁻³ -----			
Colheita manual			
Linha de plantio			
0 - 10	0,07	0,06	0,01
11 - 20	0,08	0,05	0,03
Entrelinha de plantio			
0 - 10	0,07	0,05	0,02
11 - 20	0,07	0,05	0,02
Colheita mecanizada			
Linha de plantio			
0 - 10	0,10	0,07	0,03
11 - 20	0,10	0,07	0,03
Entrelinha de plantio			
0 - 10	0,11	0,07	0,04
11 - 20	0,11	0,08	0,03
Colheita manual e mecanizada			
Linha de plantio			
0 - 10	0,09	0,06	0,03
11 - 20	0,10	0,07	0,03
Entrelinha de plantio			
0 - 10	0,11	0,07	0,04
11 - 20	0,10	0,07	0,03

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A amplitude de valores encontrados para a variável de resistência do solo a penetração (RP), demonstra a importância do uso da geoestatística, pois a média não é suficiente para representar a distribuição espacial dessa variável, principalmente em áreas de elevada variabilidade, como a CMA.

Apesar dos ajustes dos semivariogramas detectarem dependência espacial da variável RP em praticamente todas as condições, a malha amostral utilizada não é suficiente para a análise anisotrópica, o que torna-se uma limitação nesse estudo.

A utilização dos dados de linha e entrelinha de plantio de forma isolada mostra sobre a importância da distribuição de pontos durante a coleta de forma a abranger as características observadas nas áreas a fim da melhor representação possível.

A área de colheita manual (CMA) apresentou os maiores valores de RP dentre as três áreas estudadas. As áreas de colheita mecanizada (CME) e manual e mecanizada (CMM) seguiram padrão similar, apresentando baixa RP nas camadas subsuperficiais e com valores crescentes em profundidades maiores.

Os valores de RP não demonstraram a ocorrência de zonas compactadas, consideradas impeditivas ao crescimento radicular. Para a entrelinha de plantio das áreas de CME e CMM os valores médios de RP foram maiores que para a linha, pois essa é a parte que mais sofre os efeitos da compactação impostas pelo intenso tráfego de máquinas agrícolas.

A umidade variou inversamente a RP, ou seja, os maiores valores de RP foram encontrados em áreas com menor conteúdo de água no solo.

Considerando a textura arenosa dos solos estudados, os valores obtidos para RP não são considerados críticos, ou seja, não interferem negativamente no desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar.

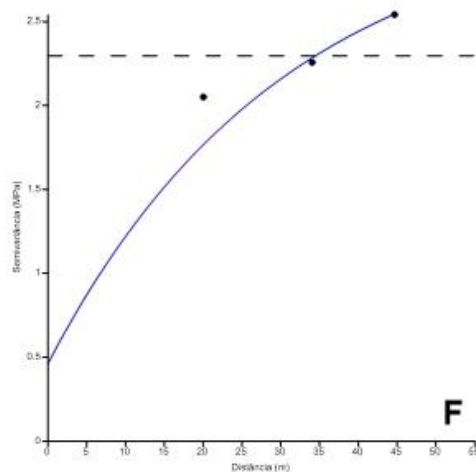
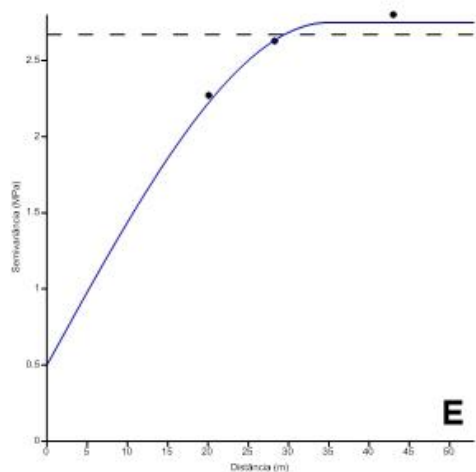
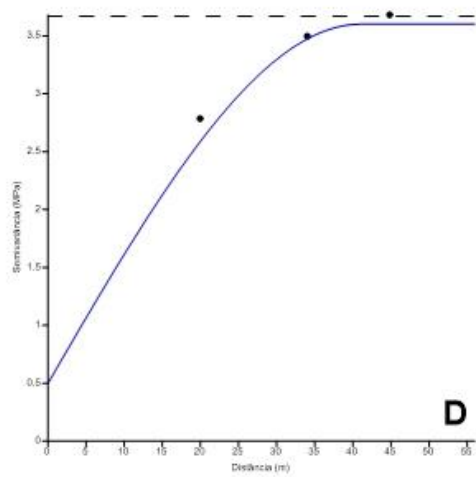
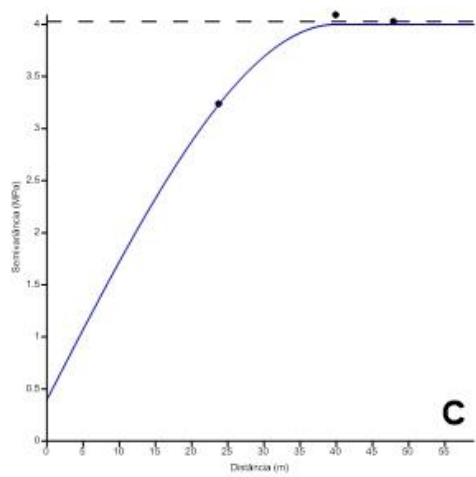
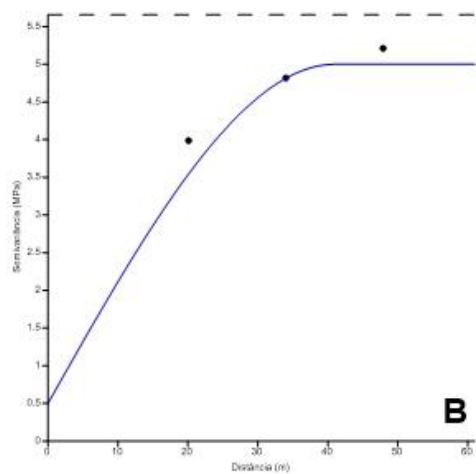
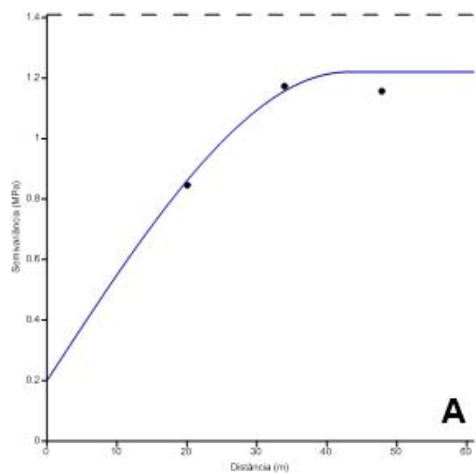
Os valores de densidade do solo (DS) aumentaram de acordo com a profundidade, demonstrando a relação desse atributo com a RP, visto que são fortes indicadores da compactação dos solos.

A macroporosidade foi maior que a microporosidade para as três áreas, demonstrando forte ligação com a condutividade hidráulica (K). Os valores de K

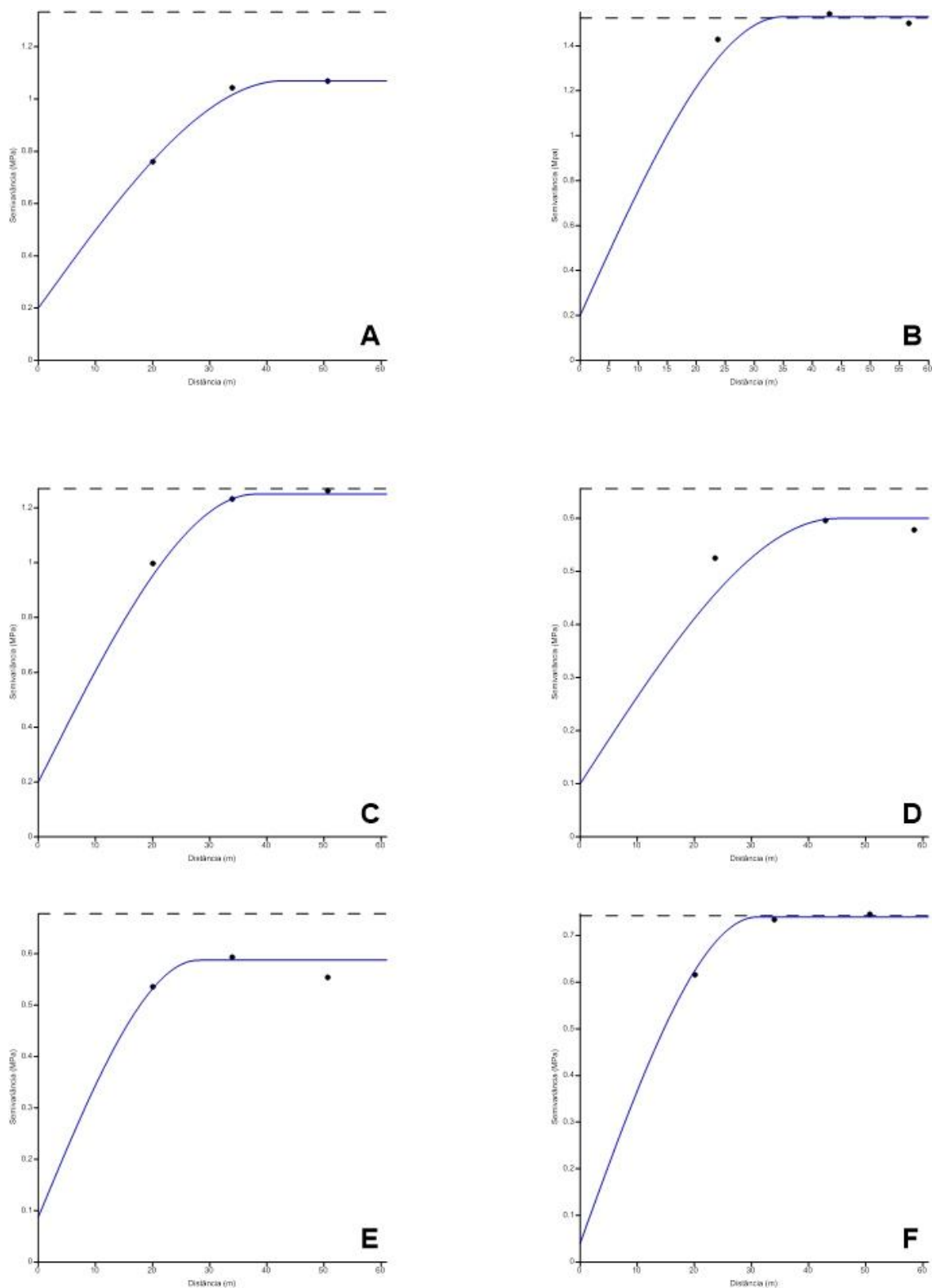
foram menores com o aumento da profundidade e em todas as áreas os maiores valores de K foram obtidos na linha de plantio.

As áreas de CME e CMM apresentaram o mesmo valor para conteúdo de água disponível. E CMA o menor valor, o que entra em concordância com os altos valores de RP encontrados para essa área.

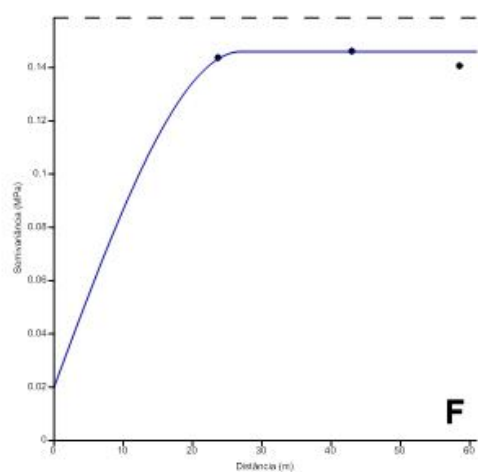
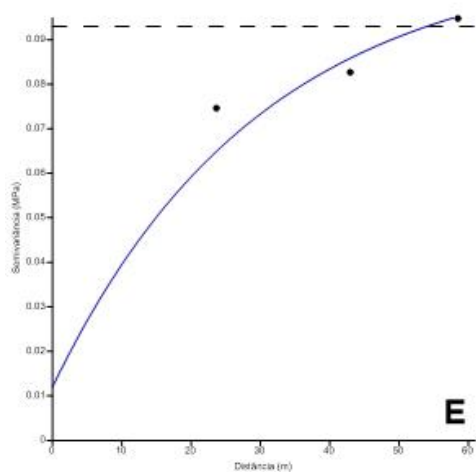
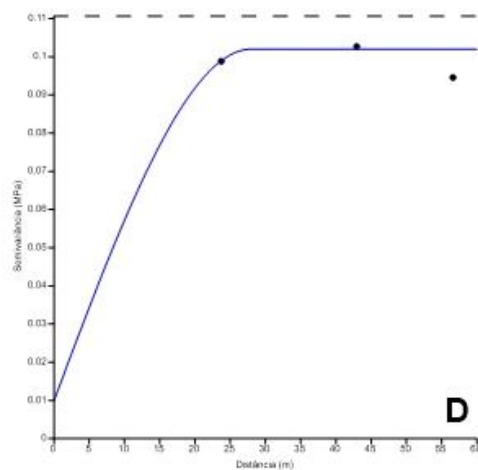
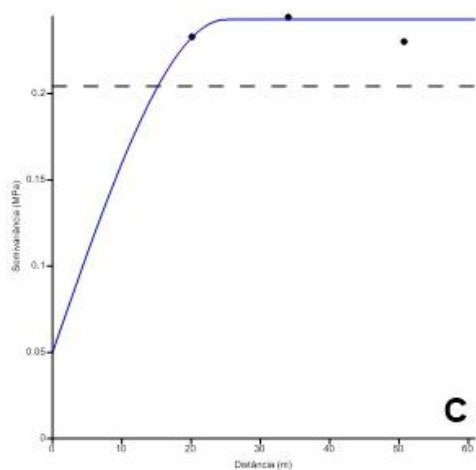
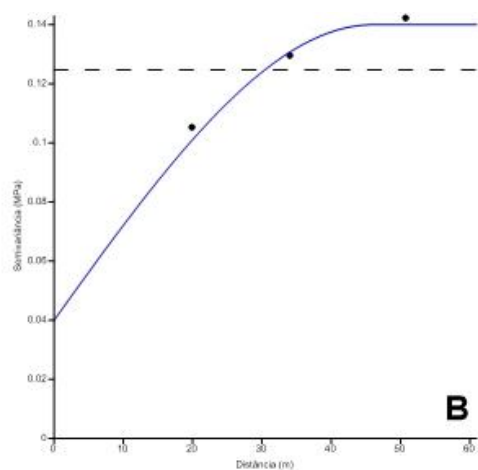
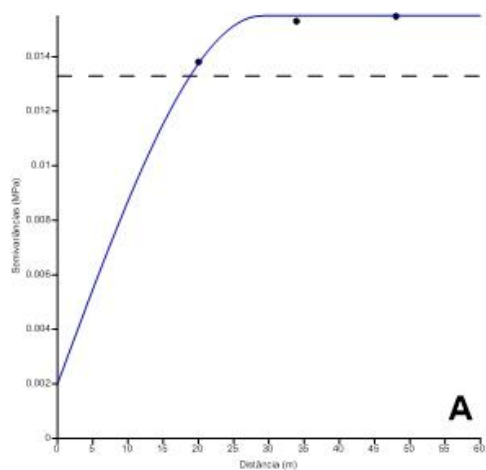
APÊNDICES



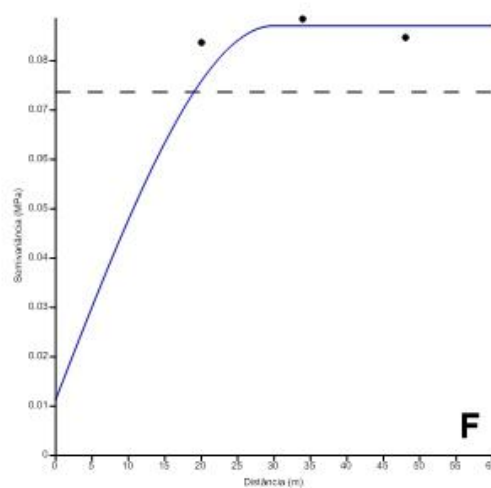
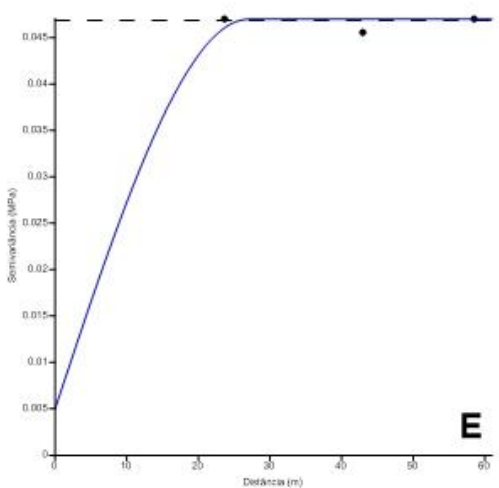
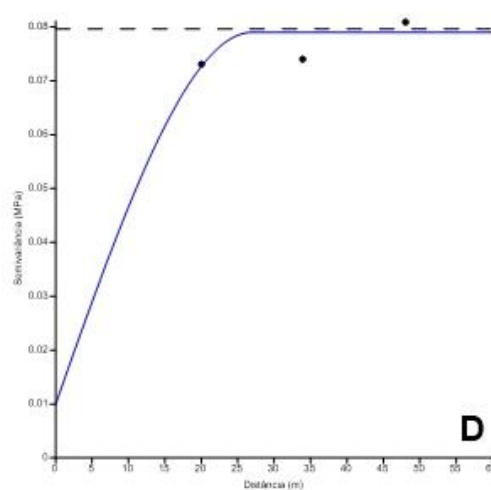
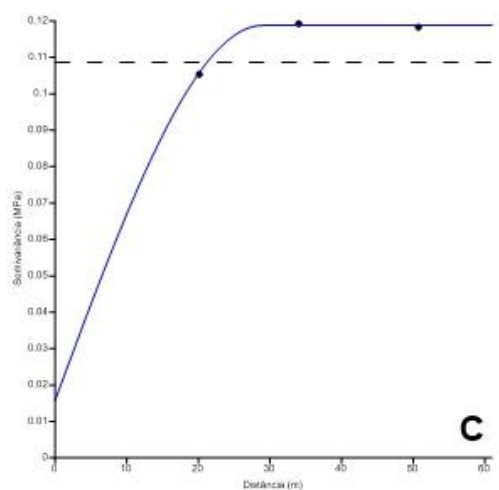
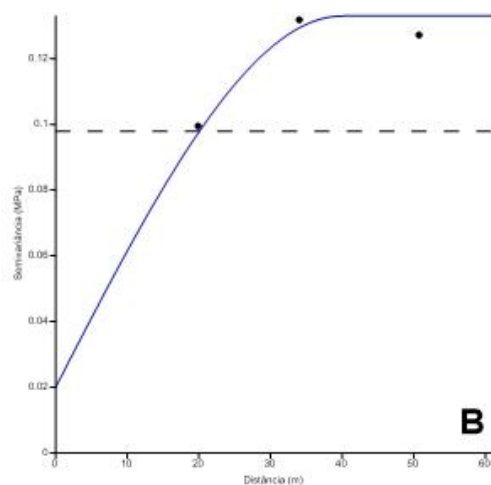
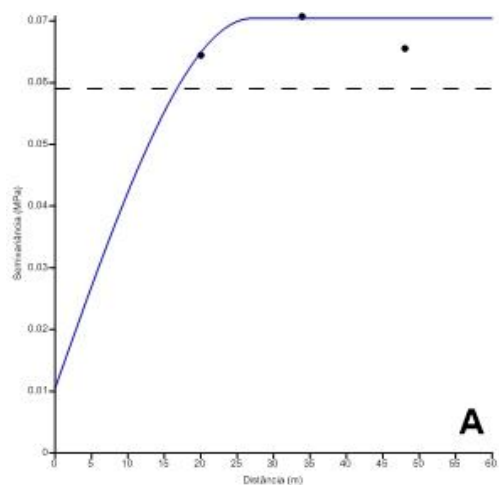
Apêndice 1A. Semivariogramas da variável Resistência a penetração para a linha de plantio da área de colheita manual nas profundidades: (A) 0-10 cm, (B) 11-20 cm, (C) 21-30 cm, (D) 31-40 cm, (E) 41-50 cm e (F) 51-60 cm



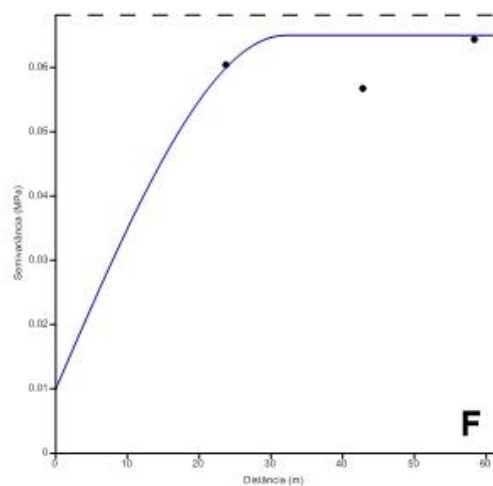
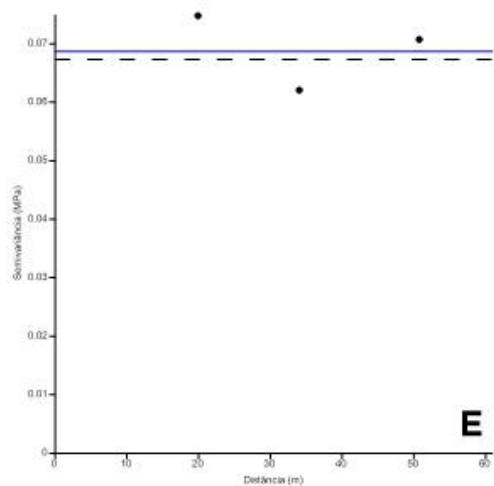
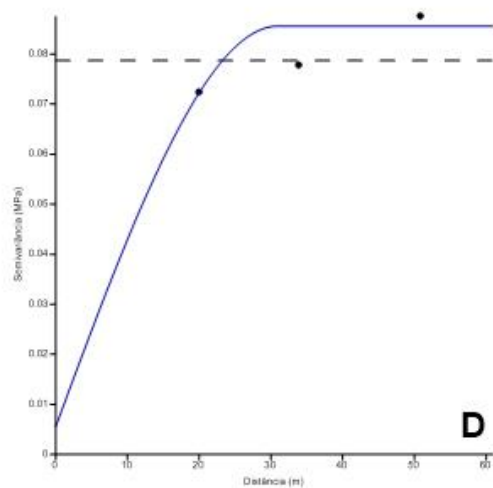
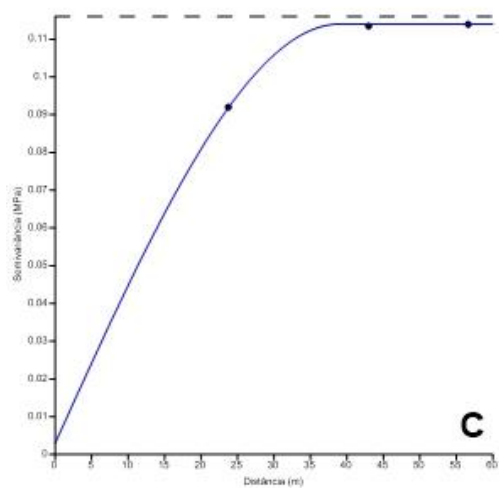
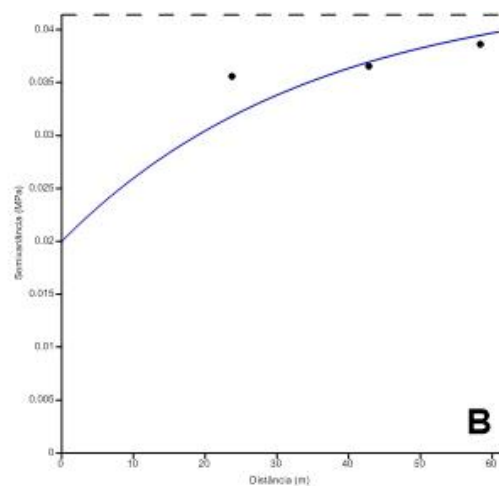
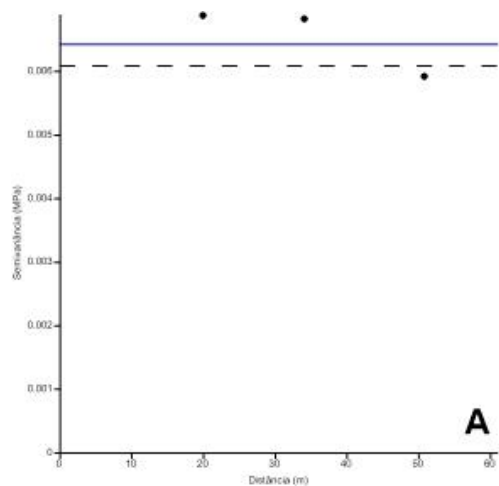
Apêndice 2A. Semivariogramas da variável Resistência a penetração para a entrelinha de plantio da área de colheita manual nas profundidades: (A) 0-10 cm, (B) 11-20 cm, (C) 21-30 cm, (D) 31-40 cm, (E) 41-50 cm e (F) 51-60 cm



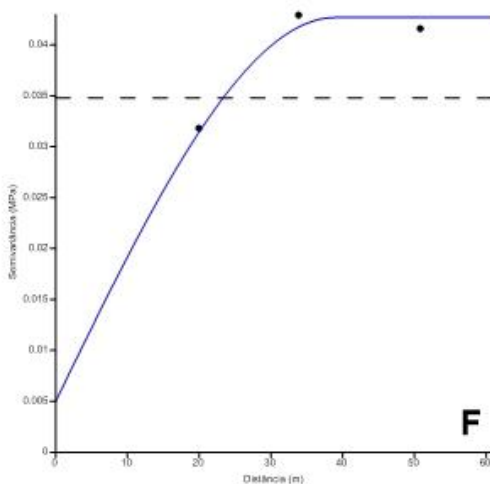
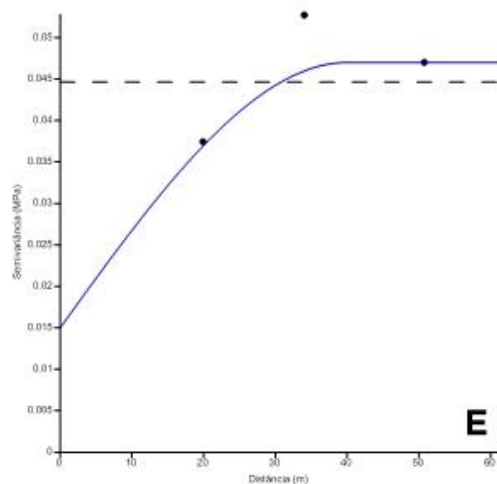
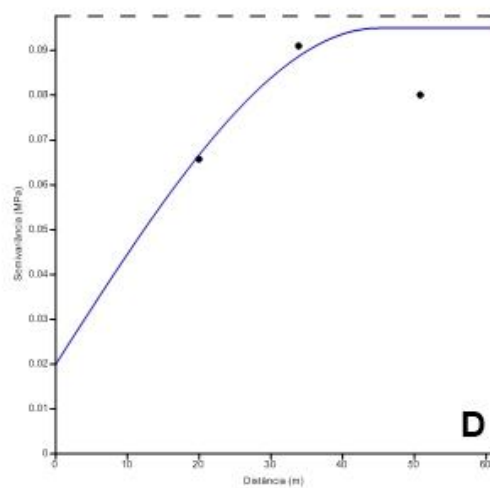
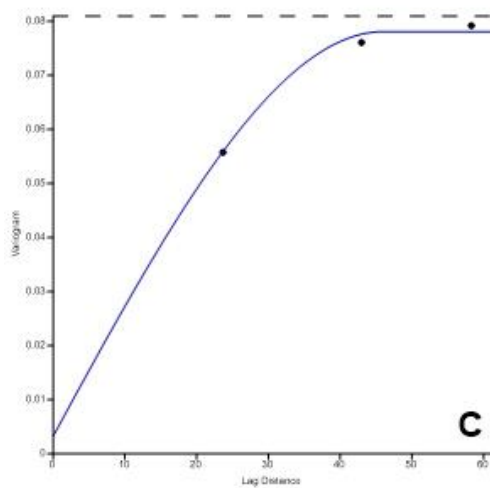
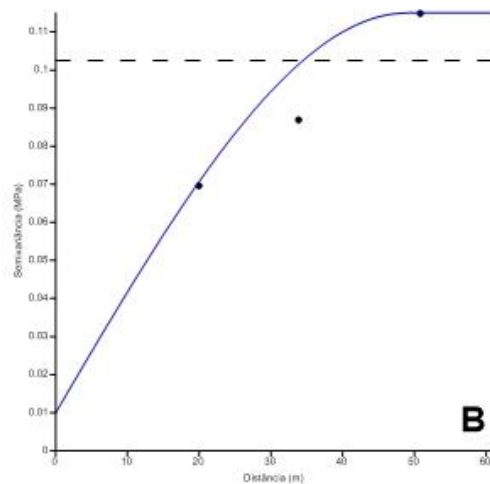
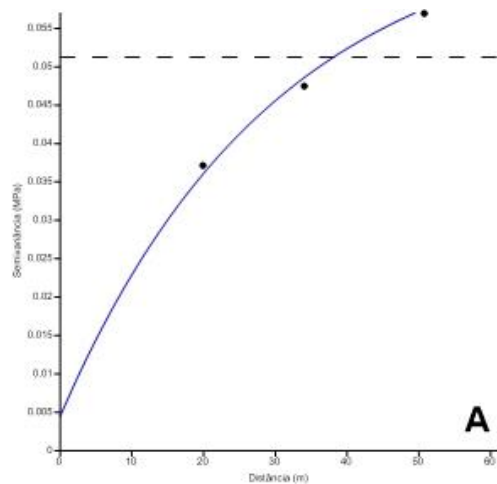
Apêndice 3A. Semivariogramas da variável Resistência a penetração para a linha de plantio da área de colheita mecanizada nas profundidades: (A) 0-10 cm, (B) 11-20 cm, (C) 21-30 cm, (D) 31-40 cm, (E) 41-50 cm e (F) 51-60 cm



Apêndice 4A. Semivariogramas da variável Resistência a penetração para a entrelinha de plantio da área de colheita mecanizada nas profundidades: (A) 0-10 cm, (B) 11-20 cm, (C) 21-30 cm, (D) 31-40 cm, (E) 41-50 cm e (F) 51-60 cm



Apêndice 5A. Semivariogramas da variável Resistência a penetração para a linha de plantio da área de colheita manual e mecanizada nas profundidades: (A) 0-10 cm, (B) 11-20 cm, (C) 21-30 cm, (D) 31-40 cm, (E) 41-50 cm e (F) 51-60 cm



Apêndice 6A. Semivariogramas da variável Resistência a penetração para a entrelinha de plantio da área de colheita manual e mecanizada nas profundidades: (A) 0-10 cm, (B) 11-20 cm, (C) 21-30 cm, (D) 31-40 cm, (E) 41-50 cm e (F) 51-60 cm



Apêndice 7A. Valores médios de química e fertilidade do solo para as áreas de colheita manual; mecanizada; manual e mecanizada

Profundidade cm	pH (H ₂ O)	P -----mg dm ³ -----	K	Na ⁺	H+Al	Ca	Mg	Al	C	MO ⁽¹⁾ -----g kg ⁻¹ -----	SB ⁽²⁾ ----- cmol _c dm ³ -----	CTC ⁽³⁾	V ⁽⁴⁾ %
												Efetiva	
Colheita manual													
Linha de plantio													
0 - 10	5,74	16,77	44,47	0,03	0,66	0,42	0,18	0,05	3,17	5,47	0,74	1,40	52,92
11 - 20	5,57	11,59	18,18	0,02	1,07	0,26	0,20	0,05	2,45	4,23	0,52	1,60	32,78
Entrelinha de plantio													
0 - 10	6,04	18,45	1,33	0,00	0,58	0,42	0,20	0,00	1,98	3,41	0,62	1,20	51,85
11 - 20	5,99	15,23	20,48	0,02	0,66	0,31	0,11	0,05	2,33	4,02	0,49	1,15	42,78
Colheita mecanizada													
Linha de plantio													
0 - 10	5,87	4,66	41,91	0,04	0,66	0,42	0,29	0,05	4,97	8,56	0,86	1,52	56,50
11 - 20	5,97	2,70	17,67	0,03	1,32	0,26	0,19	0,10	1,56	2,68	0,52	1,84	28,32
Entrelinha de plantio													
0 - 10	5,46	5,22	1,33	0,00	0,99	0,50	0,10	0,05	3,05	5,26	0,60	1,59	37,81
11 - 20	5,04	3,75	20,73	0,02	0,99	0,24	0,13	0,10	3,65	6,29	0,44	1,43	30,75
Colheita manual e mecanizada													
Linha de plantio													
0 - 10	4,72	17,26	33,49	0,02	6,02	0,43	0,17	0,40	11,13	19,19	0,71	6,73	10,52
11 - 20	4,54	12,99	18,43	0,02	7,34	0,21	0,15	0,85	9,64	16,61	0,43	7,77	5,53
Entrelinha de plantio													
0 - 10	4,51	27,61	37,32	0,02	8,25	0,30	0,32	0,60	13,53	23,32	0,74	8,99	8,24
11 - 20	4,93	8,65	1,33	0,00	7,01	0,33	0,17	0,45	11,19	19,30	0,50	7,51	6,68

⁽¹⁾ Carbono; ⁽²⁾ Soma de bases; ⁽³⁾ Capacidade de troca de cátions; ⁽⁴⁾ Saturação por bases

REFERÊNCIAS

- ABDALA, K. O.; RIBEIRO, F. L. Análise dos impactos da competição pelo uso do solo no estado de Goiás durante o período 2000 a 2009 provenientes da expansão do complexo sucroalcooleiro. **Revista Brasileira de Economia**, Rio de Janeiro, v. 65, n. 4, p. 373-400, 2011.
- ALEIXO, A. P. et al. Soil fungaland bacterial biomass determined by epifluorescence microscopy and mycorrhizal spore density in different sugarcane managements. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 4, p. 588-594, 2014.
- ANDRIOTTI, J.L.S. **Fundamentos de Estatística e Geoestatística**. São Leopoldo: Unisinos, 2003. 165p.
- AQUINO, R. F. et al. Spatial variability of the rainfall erosivity in southern region of Minas Gerais state, Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 36, n. 5, p. 533-542, 2012.
- BERNER, P. G. M. et al. Variabilidade espacial de propriedades físicas e químicas de um Cambissolo sob dois sistemas de manejo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 837-844, 2007.
- BORDIN, I. et al. Desenvolvimento de mudas de aceroleira propagadas por estacas e sementes em solo compactado. **Ciência rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 530-536, 2005.
- BRAUNACK, M. V. et al. Effect of harvest traffic position on soil conditions and sugarcane (*Saccharum officinarum*) response to environmental conditions in Queensland, Australia. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.89, p.103-121, 2006.
- CAMARGO, L. A. et al. Spatial variability of physical attributes of na alfisol under different hillslope curvatures. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 617-630, 2010.
- CANCIAN, L. C. **Variabilidade espacial da resistência a penetração, granulometria e umidade do solo**. 2015. 59 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, 2015.
- CARDOSO, E. J. B. N. et al. Soil health: looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health? **ScientiaAgricola**, Piracicaba, v. 70, n. 4, p. 274-289, 2013.
- CARVALHO FILHO, A.; SILVA, R. P.; FERNANDES, A. L. T. **Compactação do solo em cafeicultura irrigada**. Uberaba: UNIUBE, 2004. 44 p. (Boletim Técnico, 3).

CARVALHO, L. A. et al. Resistência mecânica do solo à penetração (RMP) sob cultivo de cana-de-açúcar, no município de Rio Brilhante-MS. **Revista Agrarian**, Dourados, v. 1, n. 2, p. 7-22, 2008.

CASTRO, A. N. C. et al. Avaliação de atributos físicos do solo em diferentes anos de cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Agrarian**, Dourados, v. 6, n. 22, p. 415-422, 2013.

CAVALIERI, K.M.V. et al. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, p.158-164. 2009.

CAVALIERI, K.M.V.; CARVALHO, L.A. de; SILVA, A.P. da; LIBARDI, P.L.; TORMENA, A.C. Qualidade física de três solos sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, p.1541-1550, 2011.

CENTURION, J. F. Influência do cultivo da cana-de-açúcar e da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de latossolos vermelhos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 199-209, 2007.

CHIODEROLI, C. A. et al. Spatial and linear correlations between soil and corn. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 3, p. 765-774, 2012.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-Açúcar: quarto levantamento, safra 2017/2018**. Brasília: CONAB, 2017. 62p. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_04_20_14_04_31_boletim_cana_portugues_-_1o_lev_-_17-18.pdf>. Acesso em: 30 maio 2017.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Série histórica de área plantada: cana-de-açúcar**. Brasília, 2016. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&t=&Pagina_objcmsconteudos=2#A_objcmsconteudos>. Acesso em: 30 maio 2017.

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

CRESSIE, N.A.C. **Statistics for spatial data**. New York: John Wiley, 1991. 900p.

DALCHIAVON, F. C. et al. Inter-relações da produtividade de cana soca com a resistência à penetração, umidade e matéria orgânica do solo. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 61, n. 2, p. 255-264, 2014.

DALE, M. R. T. et al. Conceptual and mathematical relationships among methods for spatial analysis. **Ecography**, Copenhagen, v. 25, n. 5, p. 558–577, 2002.

DELALIBERA, H. C. et al. Management zones in agriculture according to the soil and landscape variables. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 6, p. 1197-1204, 2012.

DONAGEMA, G. K. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2011. 230p.

FAO. **FAOSTATS. Agricultura - Divisão de Estatísticas da FAO**. 2014. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>>. Acesso em: 20 abr. 2017.

FREDDI, O. S. et al. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em Latossolo vermelho. I -características de planta, solo e índice S. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 793-803, 2009.

FREIRE, M.B.D.S. et al. Condutividade hidráulica de solos de Pernambuco em resposta à condutividade elétrica e RAS da água de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 1, p. 45-52, 2003.

GONÇALVES, A. D. M. A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 2, p. 1174-1184, 2013.

GONÇALVES, W.G.et. al. Least limiting water range in assessing compaction in a Brazilian Cerrado Latosol growing sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 432-443, 2014.

GREGO, C. R. et al. Spatial variability of some biometric attributes of sugarcane plants (variety IACSP93-3046) and its relation to physical and chemical soil attributes. **Bragantia**, Campinas, v. 69, supl., p. 107-119, 2010.

GUEDES FILHO, O. et al. Geostatistical analysis of crop yield maps in a long term no tillage system. **Bragantia**, Campinas, v. 69, p. 9-18, 2010.

LIMA, C. G. R.; CARVALHO, M. P. Correlação linear e espacial entre a produtividade de forragem de milho e frações granulométricas de um latossolo vermelho distrófico. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 4, p. 985-990, 2009.

LIMA, J. S. S.; SOUZA, G. S.; SILVA, S. A.; Amostragem e variabilidade espacial de atributos químicos do solo em área de vegetação natural em regeneração. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 1, p.127-136, 2010.

MENDES, F. G. et al. Aplicação de atributos físicos do solo no estudo da qualidade de áreas impactadas, em Itajubá/MG. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 3, p. 211-220, 2006.

MEZACASA, C.P.R. et. al. Condutividade hidráulica e relação com a porosidade e densidade do solo em pomar de pêssego. In.: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS, 24. 2015, Pelotas. **Anais...** Pelotas: UFPel, 2015.

- MOLIN, J. P. et al. Yield mapping, soil fertility and tree gaps in na Orange orchard. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Cruz das Almas, v. 34, n. 4, p. 1256-1265, 2012.
- MORALES, L. A. et al. Spatial and temporal variability of Eh and pH over a rice field as related to lime addition. **Bragantia**, Campinas, v. 69, supl., p. 67-76, 2010.
- ORJUELA-MATTA, H. M. et al. Spatial variability of hydrodynamic parameters in the native savana of the Colombian Eastern plains. **Agronomia Colombiana**, Bogotá, v. 29, n. 1, 83-90, 2011.
- OTTO, R. et al. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, NL, v.117, p.201-210, 2011.
- PARIZ, C. M. et al. Spatial variability of forage yield and soil physical atributes of a Brachiaria decumbens pasture in the Brazilian Cerrado. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 40, n. 10, p. 2111-2120, 2011.
- PEREIRA, G. T. et al. Optimization of the sampling scheme for maps of physical and chemical properties estimated by kriging. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 5, p. 1128-1135, 2013.
- QUEIROZ, R. P. et al. Inter-relation between soybean yield and soil compaction under degraded pasture in Brazilian Savannah. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 5, p. 1579-1588, 2011.
- REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 27, p. 29-48, 2003.
- REICHERT, J. M. et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil andTillage Research**, Amsterdam, v. 102, n. 2, p. 242-254, 2009.
- RODRIGUES, K. M. **Variabilidade espacial de atributos físicos, químicos e biológicos do solo e a produtividade da cana-de-açúcar**. 2014. 176 f. Tese (Doutorado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agrônômico, Campinas, 2014.
- SANTOS, M. L. et al. Correlação linear e espacial entre produtividade de milho e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto do cerrado brasileiro. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.28, n.3, p.313-321, 2006.
- SATOLO, L. F.; BACCHI, M. R. P. Dinâmica econômica das flutuações na produção de cana-de-açúcar. **Economia Aplicada**, Ribeirão Preto, v. 13, n. 3, p. 377-397, 2009.
- SCHULTZ, N. et al. Inoculation of sugarcane with diazotrophic bacteria. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 2, p. 407-414, 2014.

SENE, M. Relationships of soil texture and structure to corn yield response to subsoiling. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, Wis., US, v. 49, p. 422-427, 1985.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 921-930, 2006.

SILVA, J. G. **Ordens de gradagem e sistemas de aração do solo: desempenho operacional, alterações na camada mobilizada e respostas do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.)**. 1992. 180 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Botucatu, Universidade Estadual Paulista, 1992.

SILVA, J. R.; NOGUEIRA JUNIOR, S. Cereais de inverno: Entraves e possibilidades no Estado de São Paulo. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 31, n. 5, p. 55-57, 2001.

SILVA, R. P.; FERNANDES, C. Soil uses during the sugarcane fallow period: influence on soil chemical and physical properties and on sugarcane productivity. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 2, p. 575-584, 2014.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S. Multivariate analysis and geostatistics of the fertility of a humichrodic hapludox under coffee cultivation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 467-474, 2012.

SOUZA, Z. M. et al. Número de amostras na análise geoestatística e na krigagem de mapas de atributos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 2, p. 261-268, 2014.

SOUZA, Z. M. et al. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 3, p. 271-278, 2005.

SOUZA, Z. M. et al. Spatial variability of the physical and mineralogical properties of the soil from the areas with variation in landscapes hapes. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 52, n. 2, p. 305-316, 2009.

SOUZA, Z. M. et al. Variabilidade espacial de atributos do solo e produtividade da cultura de cana-de-açúcar em relação a localização topográfica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 12, p. 1250-1256, 2010.

SPEZIA, G. R. et al. Model to estimate the sampling density for establishment of yield mapping. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 4, p. 449-457, 2012.

TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J. Homogeneidade da qualidade física do solo nas entrelinhas de um pomar de laranja com sistemas de manejo da vegetação. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, v.31, n. 3, p. 637-645, 2007.

VAN LIER, Q. de J.; GUBIANI, P.I. Beyond the “Least Limiting Water Range”: rethinking soil physics research in Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.39, p.925-939, 2015.

VASCONCELOS, R. F. B. et al. Qualidade física de Latossolo Amarelo de tabuleiros costeiros em diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 4, p. 381-386, 2014.

VEPRASKAS, M.J. Plant response mechanisms to soil compaction. In: WILKINSON, R. (Ed.). **Plant Environment Interactions**. New York: M. Dekker, 1994. p. 263-287.

VIANA, E.T. Atributos físicos e carbono orgânico em Latossolo vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 6, p. 2105-2114, 2011.

VIEIRA, S. R. et al. Handbook for geoestatistical analysis of variability in soil and climate data, In: ALVAREZ, V. V. H. et al. Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, p. 1-45, 2002.

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

WACLAWOSKY. A. J. et al. Sugarcane for bioenergy production: na assessmen to fyield and regulation of sucrose content. **Plant Biotechnology**, Oxford, v. 8, p. 263-276, 2010.

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

ZIMBACK, C.R.L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo**. 2001. 114 f. Tese (livre-Docência) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.