



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE SOLOS E ENGEHARIA RURAL
CURSO AGRONOMIA**

**RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO À PENETRAÇÃO E
TEXTURA DO SOLO EM ÁREA DE COLHEITA MECANIZADA DE
CANA-DE-AÇÚCAR NO LITORAL PARAIBANO.**

GIOVANNI SALES DE LIMA

**AREIA – PB
SETEMBRO – 2013**

GIOVANNI SALES DE LIMA

**RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO À PENETRAÇÃO E
TEXTURA DO SOLO EM ÁREA DE COLHEITA MECANIZADA DE
CANA-DE-AÇÚCAR NO LITORAL PARAIBANO.**

Trabalho apresentado à coordenação do curso de graduação em Agronomia do Centro de Ciências Agrárias, da Universidade Federal da Paraíba, Areia-PB, em observância às exigências para obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. Maurício Javier de León

Departamento de Solos e Engenharia Rural - CCA/UFPB

**AREIA – PB
SETEMBRO – 2013**

Ficha Catalográfica Elaborada na Seção de Processos Técnicos da
Biblioteca Setorial do CCA, UFPB, Campus II, Areia – PB.

L732r Lima, Giovanni Sales de.

Relação entre resistência mecânica do solo à penetração e textura do solo em área de colheita mecanizada de cana-de-açúcar no litoral paraibano / Giovanni Sales de Lima. - Areia: UFPB/CCA, 2014.

57 f. : II

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Agronomia) - Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2014.

Bibliografia.

Orientador: Maurício Javier de Léon

1. Cana-de-açúcar 2. Agricultura de Precisão 3. Solo – compactação 4. Solo - Textura I. Léon, Maurício Javier de (Orientador) II. Título.

UFPB/CCA

CDU: 633.61

GIOVANNI SALES DE LIMA

**RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO À PENETRAÇÃO E
TEXTURA DO SOLO EM ÁREA DE COLHEITA MECANIZADA DE
CANA-DE-AÇÚCAR NO LITORAL PARAIBANO.**

BANCA EXAMINADORA

APROVADA EM: 16 / 09 / 2013

Prof. Dr. Maurício Javier de Léon
DSER/CCA/UFPB
-Orientador-

M.Sc. Richardson Soares de Souza Melo
(PPGCS/CCA/UFPB)
-1º Examinador-

Eng. Agrônomo Dante Hugo Vasconcelos Guimarães
(USINA JAPUNGU)
-2º Examinador-

AGRADECIMENTOS...

À Deus, por tudo de maravilhoso que proporciona em minha vida, estando sempre ao meu lado, concedendo saúde e confiança, guiando-me em minhas decisões e dando forças.

... à meu pai Antônio Alves de Lima, por todo seu amor, que não mediu esforços para me proporcionar a melhor educação, companheirismo, orientação, demonstrados ao longo de minha vida.

...aos meus irmãos, Antônio Aécio Sales de Lima, Diana Sales de Lima e Denise Sales de Lima pelo companheirismo, me direcionando e incentivando para seguir em frente.

... à minha segunda mãe Dona Suzana que sempre me incentivou a alcançar meus objetivos, demonstrando sempre carinho e atenção nas horas mais difíceis da minha vida.

... ao meu Orientador Maurício Javier de Léon , a qual levarei por toda minha vida na memória, agradeço pela grande contribuição oferecida para minha formação profissional, pela paciência, pela amizade demonstrada, pelos conselhos, críticas e incentivo.

... à Professora Márcia Roseane Targino de Oliveira pelos seus ensinamentos e a pessoa maravilhosa que é , por toda ajuda concedida, pelos conselhos, e pela contribuição em minha formação acadêmica e principalmente pessoal.

... ao meu amigo Normando Mendes Ribeiro Filho, agradeço pela grande contribuição oferecida para minha formação profissional e pessoal, pela amizade demonstrada, pelos conselhos e incentivo ao meu crescimento profissional e a não temer os desafios.

... a todos os colegas de turma, sem exceção, e a todos os amigos: Danilo Wanderley, Altamiro, Erikson, Samuel, Pedreo, Jefferson, Edgley, Júnior (Galetão), Guilherme, Henrique, José Ronaldo, Renato, Flaviano, Rafael Gouveia, Wendel, Ponciano, Rodrigo, Jardélio, Lucas, Neto Garcia, Ricardo, Marcelo Hipólito, João Felix, Joalison, Nadja, Raiane, Mirian, Rafaela, Lúcia, Marcos, Rommel, Anderson Bruno, Marcelo Aquino, Gustavo Araújo entre outros e que de alguma forma contribuíram para minha formação acadêmica.

... ao Centro de Ciências Agrárias e à Universidade Federal da Paraíba por me conceder a honra de me tornar membro desta casa e sair dela com o título de Engenheiro Agrônomo.

... a todos os professores e demais funcionários do CCA/UFPB que me repassaram o conhecimento e que em muito contribuíram para minha formação profissional.

Dedico...

A minha mãe Maria José de Sales Lima

(in memoriam).

*... Enfim, a todos que contribuíram de alguma
forma em minha vida.*

MUITO OBRIGADO!!!

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
1 –INTRODUÇÃO.....	1
2 - REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1- Cana-de-açúcar.....	3
2.2 - Efeitos da resistência mecânica do solo à penetração no desenvolvimento radicular da cana -de-açúcar	4
2.3 - Agricultura de precisão	5
2.4 - Compactação do solo	6
2.5 - Textura do solo.....	7
2.6 - Resistência mecânica do solo à penetração.....	8
2.7 – Geoestatística.....	9
2.8 - Variabilidade espacial de atributos físicos do solo	10
2.9 – Semivariogramas	10
3 – OBJETIVO	12
3.1 Geral	12
3.2 Específico	12
4 - MATERIAL E MÉTODOS	13
4.1 - Caracterização da área de estudo e localização.....	13
4.2 - Clima e vegetação	14
4.3 - Relevo e solos	14
4.4 - Amostragem da área.....	14
4.5 - Penetrômetro eletrônico	15
4.6 - Determinações físicas do solo	17
4.6.1 - Textura do solo.....	17
4.6.2 - Resistência Mecânica do Solo à Penetração (RMSP)	17
4.7 - Análise estatística e geoestatística e confecção de mapas temáticos	18
4.7.1 - Análise estatística descritiva dos dados de RMSP e da textura do solo.....	18
4.7.2 - Análise geoestatística dos dados de RMSP e da textura do solo	18

4.7.3 - Confeção dos mapas temáticos dos atributos físicos resistência mecânica do solo à penetração (RMSP) e textura do solo	19
5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
6 – CONCLUSÃO.....	37
7 – BIBLIOGRAFIA	38

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Coordenadas UTM da área estudada na Usina Japungu em Santa Rita – PB. 13

TABELA 2 - Resultado Textural Argissolo Vermelho Amarelo Fazenda Boa Vista Usina Japungu, Santa Rita - PB..... 14

TABELA 3 - Parâmetros matemáticos dos semivariogramas para as frações do solo, areia, silte e argila na profundidade 0.11 - 0.20 m..... 20

TABELA 4 - Estatística descritiva dos atributos físicos do solo: areia, silte e argila..... 22

TABELA 5 - Estimativa dos parâmetros ajustados aos semivariogramas para o atributo físico resistência mecânica do solo à penetração..... 32

TABELA 6 - Estatística descritiva do atributo físico do solo: Resistência Mecânica do Solo à Penetração (RMSP)..... 34

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Semivariograma experimental com indicação dos parâmetros estimados...	11
FIGURA 2 - Mapa do município de Santa Rita – PB (A) e área de estudo (B).....	13
FIGURA 3 - Grade regular amostral para resistência mecânica do solo à penetração.....	16
FIGURA 4 - Grade regular amostral para textura do solo.....	16
FIGURA 5 - Pontos para amostragem da textura do solo.....	17
FIGURA 6 - Variograma do atributo areia na profundidade 0.11 – 0.20 m.....	23
FIGURA 7 - Distribuição da fração areia no intervalo de valores em g.Kg^{-1}	24
FIGURA 8 - Mapa das isolinhas da fração areia g.Kg^{-1}	24
FIGURA 9 - Variograma do atributo silte na profundidade 0.11 – 0.20 m.....	25
FIGURA 10 - Distribuição da fração silte no intervalo de valores em g.Kg^{-1}	25
FIGURA 11 - Mapa das isolinhas da fração silte g.Kg^{-1}	26
FIGURA 12 - Variograma do atributo argila na profundidade 0.11 – 0.20 m.....	26
FIGURA 13 - Distribuição da fração argila no intervalo de valores em g.Kg^{-1}	27
FIGURA 14 - Mapa das isolinhas fração argila em g.Kg^{-1}	27
FIGURA 15 - Variograma do atributo RMSP na profundidade 0.01 – 0.05 m.....	28

FIGURA 16 - Distribuição da RMSP 0.01 – 0.05 m no intervalo de valores em kPa.....	29
FIGURA 17 - Variograma do atributo RMSP na profundidade 0.06 – 0.10 m.....	29
FIGURA 18 - Distribuição da RMSP 0.06 – 0.10 m no intervalo de valores em kPa.....	30
FIGURA 19 - Variograma do atributo RMSP na profundidade 0.11 – 0.15 m.....	30
FIGURA 20 - Distribuição da RMSP 0.11 – 0.15 m no intervalo de valores em kPa.....	31
FIGURA 21 - Variograma do atributo RMSP na profundidade 0.16 – 0.20 m.....	31
FIGURA 22 - Distribuição da RMSP 0.16 – 0.20 m no intervalo de valores em kPa.....	32
FIGURA 23 - Mapa de RMSP na profundidade 0.01 – 0.05 m.....	35
FIGURA 24 - Mapa de RMSP na profundidade 0.06 – 0.10 m.....	35
FIGURA 25 - Mapa de RMSP na profundidade 0.11 – 0.15 m.....	36
FIGURA 26 - Mapa de RMSP na profundidade 0.16 – 0.20 m.....	36

RESUMO

A cada ano, o Brasil se consolida como maior produtor da cana-de-açúcar do mundo e mediante a necessidade de uma fonte de energia renovável e limpa, a cana-de-açúcar tem ocupado papel decisivo no desenvolvimento econômico mundial. A região nordeste possui aproximadamente 16% da produção nacional, apresentando diferença significativa quando comparada à produção nas regiões sudeste e sul do país. Com o uso intensivo de terras agricultáveis para a produção de alimentos e bioenergia tem ocasionado aceleração do processo de degradação do solo especialmente nos atributos físicos do solo. Este problema tem se agravado devido ao crescente uso das máquinas agrícolas e frequência do tráfego dessas máquinas, em função dos curtos períodos de plantio, em detrimento das condições climáticas, cumprimento de contratos agrícolas por parte dos produtores e avanço de novas tecnologias. Diante deste cenário a resistência mecânica do solo à penetração surge como parâmetro de avaliação da qualidade física do solo em detrimento do intenso uso de máquinas agrícolas em especial na colheita mecanizada da cana-de-açúcar aliada a agricultura de precisão. A pesquisa foi conduzida em área de 40 ha pertencente à Usina Japungu localizada no município de Santa Rita – PB. Para areia, silte e argila foram coletadas 68 amostras na profundidade 0.11 – 0.20 m e à resistência mecânica do solo à penetração foram amostrados 151 pontos na profundidade 0.01 – 0.20 m. Esses resultados indicam que, na área estudada, há dependência espacial dos atributos estudados e existe camada compactada na profundidade de 0.16 – 0.20 m.

Palavras-chave: Resistência Mecânica do Solo à penetração, Agricultura de Precisão, Cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.).

**RELATIONSHIP BETWEEN MECHANICAL SOIL PENETRATION RESISTANCE
OF SOIL TEXTURE OF COMBINE HARVESTING AREA ON CANE SUGAR
COAST PARAIBANO.**

ABSTRACT

Every year, Brazil has established itself as the largest producer of cane sugar in the world and by the need for a source of clean and renewable energy, the cane sugar has occupied decisive role in world economic development. The northeastern region has approximately 16% of domestic production, significant difference when compared to the production in the southeast and south. The intensive use of arable land for food production and bioenergy has caused acceleration of soil degradation especially in soil physical properties. This problem has been aggravated due to the increasing use of agricultural machinery traffic and frequency of these machines, due to the short periods of planting, to the detriment of weather conditions, compliance with contract farming by farmers and advancement of new technologies. In this scenario the mechanical resistance to penetration comes with a parameter for assessing soil physical quality in detriment of the intensive use of agricultural machinery in particular mechanical harvesting of cane sugar combined with precision farming. The research was conducted in an area of 40 ha belonging to Japungu Usina located country Santa Rita - PB. For sand, silt and clay were collected 68 samples in depth 0.11 - 0.20 m to soil mechanical resistance to penetration sampled 151 points in depth 0.01 - 0.20 m. These results indicate that, in the study area, there is spatial dependence of the attributes studied and there is compacted layer depth 0.16 - 0.20 m.

Keywords: Resistance to penetration Soil Mechanics, Precision Agriculture, Sugarcane (*Saccharum* spp.)

1. INTRODUÇÃO

A resistência mecânica do solo à penetração é um parâmetro importante para a caracterização do perfil e manejo do solo utilizado em áreas agrícolas. A caracterização e identificação da camada com resistência mecânica à penetração no perfil do solo fornecem informações importantes sobre o estado físico do solo. Este diagnóstico utilizado no manejo visa minimizar a degradação do solo, diminuição da erosão, diminuição do escoamento superficial, aumento de absorção de nutrientes e melhora a eficiência da adubação com benefícios no incremento da produtividade agrícola em especial à cana-de-açúcar.

A estrutura do solo é um dos atributos mais importantes na adaptação das culturas e que pode ser avaliada por meio da densidade do solo, macro e microporosidade, estabilidade de agregados, resistência mecânica à penetração e permeabilidade do solo, dentre outros, que podem ser utilizados como indicadores das condições de adensamento e compactação, além de subsidiar o controle da perda de produtividade e da degradação ambiental segundo NÓBREGA et al. (2005).

A qualidade do solo é função de alguns atributos que promovem o bom desenvolvimento das raízes, tais como: infiltração e movimento de água no perfil, trocas gasosas, atividade biológica e mineralização de carbono. Todos esses atributos são, em parte, relacionados com as propriedades e os processos físicos do solo CARVALHO et al. (2008).

O manejo do solo adotado nas culturas de ciclo médio e longo é um dos principais fatores que influem no comportamento das propriedades físicas e mecânicas do solo, assim como a sua granulometria, a magnitude das cargas verticais impostas ao solo pelo tráfego de máquinas agrícolas que são transmitidas ao solo por meio de seus rodados.

Uma das propriedades físicas importantes para o manejo e estudo da qualidade física dos solos é sua resistência à penetração, uma vez que essa propriedade apresenta-se relacionada com diversos atributos do solo, indicadores do grau de compactação RIBON & TAVARES FILHO, (2008). Já para Vargas (1981), caracteriza a resistência à penetração como uma propriedade mecânica do solo e que depende, ao mesmo tempo, dos seguintes fatores: granulometria (ou tamanho das partículas do solo), espécie mineralógica da fração argila, teor de água e arranjo das partículas do solo. Uma das culturas mais afetadas pela alteração das condições físicas do solo é a cana-de-açúcar, uma vez que, em decorrência da colheita mecanizada, a compactação pode promover reduções superiores a 50% no volume de

macroporos do solo. Por sua vez, essa alteração estrutural pode comprometer a sustentabilidade dessa atividade agrícola, pois essa classe de poros determina a taxa de movimentação de água no solo SEVERIANO et. al. (2010).

Para verificar a existência de camadas compactadas, o penetrômetro é o instrumento que, por meio do valor da resistência do solo à penetração, mede a resistência física que o solo oferece a algo que tenta se mover através dele, como uma raiz em crescimento ou uma ferramenta de cultivo ROBOREDO et al. (2010); BEUTLER et al. (2007). Na prática, o conhecimento da resistência à penetração é importante, pois permite identificar as condições nas quais poderá ocorrer impedimento ao crescimento radicular das plantas.

Desse modo, o presente trabalho tem como objetivo de avaliar a relação entre o agrupamento dos percentuais das frações granulométricas do solo areia, silte e argila com os valores correspondentes de resistência mecânica do solo à penetração em área de colheita mecanizada de cana-de-açúcar no litoral paraibano.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 - Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma planta perene da família das *Poaceae* e tem como características o perfilhamento abundante na fase inicial de crescimento, aliado ao intenso crescimento do sistema radicular fasciculado. Posteriormente, segue a fase de grande crescimento, com grande acúmulo de massa seca, tanto na parte aérea como no sistema radicular, seguido da fase final onde ocorre a maturação, ou seja, acúmulo de sacarose nos colmos. Entretanto, são vários os fatores que promovem a inibição ou favorecem o desenvolvimento da cultura OLIVEIRA et al. (2004); IDO et al. (2006). É considerada originária do Sudeste Asiático, na grande região da Nova Guiné e Indonésia DANIELS & ROACH, (1987).

O Brasil a cada ano que se passa se firma como maior produtor da cana-de-açúcar no mundo. A região nordeste possui aproximadamente 16% da produção nacional, apresentando diferença significativa quando comparada à produção nas regiões sudeste e sul do país. A indústria canavieira é uma das principais atividades sócio econômica gerando emprego e renda. A área cultivada com cana-de-açúcar, colhida na safra 2012/13, e destinada à atividade sucroalcooleira foi de 8.485,0 mil hectares, distribuídas em todos estados produtores conforme suas características, CONAB (2013), sendo que, na Região Nordeste a área reduziu 2,8% ou 31,3 mil hectares, devido à falta de renovação dos canaviais, a dificuldade de uso de maquinário devido à topografia acidentada e a dificuldade de utilização de mão de obra, segundo CONAB (2013).

Levando-se em consideração a necessidade e a crescente procura por novas alternativas de combustível, o Governo Federal tem promovido incentivos à produção do etanol, como combustível renovável de alto valor agregado com responsabilidade socioambiental MACEDO, (2007).

O Nordeste corresponde a uma produção de (73.106.139 t), o estado de Alagoas lidera a produção de (29.500.000 t), seguido de Pernambuco (17.088.642 t) e Paraíba (6.185.236 t) IBGE, (2012). A produção de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) no Nordeste do Brasil tem sido baixa quando comparada com as regiões sudeste e centro-oeste RODRIGUES & ORTIZ, (2006). Várias causas vêm se destacando, tais como baixa fertilidade do solo, baixo índice pluviométrico, pragas e doenças, plantas daninhas e agora com a implementação da colheita

mecanizada tem potencializado essa redução na produtividade dos canaviais nordestinos, em função das alterações de ordem física do solo como aumento da densidade, redução da macroporosidade, redução da velocidade de infiltração da água no solo, redução da respiração do solo e aumento da resistência mecânica do solo à penetração.

Diante dessa problemática de ordem física advinda do intenso uso de máquina na colheita mecanizada da cultura da cana-de-açúcar, se faz necessário à correta identificação do problema e posteriormente as possíveis causas e soluções objetivando redução desses impactos causados pela colheita mecanizada na cultura da cana-de-açúcar.

2.2 - Efeitos da resistência mecânica do solo à penetração no desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar

A compreensão dos fenômenos que ocorrem na parte aérea das plantas torna-se mais completa quando também se compreende o que ocorre abaixo da superfície do solo, principalmente com relação ao crescimento e à distribuição de raízes no perfil. O sistema radicular é o principal elo de ligação entre a planta e o ambiente de produção. Condições desfavoráveis do solo que restringem o desenvolvimento de raízes constituem a razão mais comum pela qual as culturas não conseguem expressar todo seu potencial genético de produtividade. As condições desfavoráveis do solo podem ser de três tipos: estresse biológico, estresse químico e estresse físico.

O estresse físico pode ser caracterizado pelo inadequado suprimento de água, pelo impedimento mecânico à penetração de raízes, por condições de anaerobiose ou pela temperatura do solo inadequada. Densidade, porosidade e resistência à penetração são atributos que auxiliam na avaliação do estresse físico que interfere no desenvolvimento do sistema radicular. O crescimento de raízes é inibido em camadas de solo extremamente adensadas em função da elevada resistência à penetração, da aeração deficiente, do baixo movimento de nutrientes e água, além da formação de locais onde se acumulam gases tóxicos e exsudados de raízes.

De maneira geral, valores de resistência do solo à penetração, considerados críticos ao crescimento radicular, variam de 1,5 a 3,0 MPa. Valores em torno de 2,5 MPa são considerados baixos, ao passo que valores em torno de 3,5 a 6,5 MPa, são considerados como valores capazes de causar problemas para o desenvolvimento radicular de leguminosas e gramíneas (TORRES & SARAIVA, 1999).

2.3 - Agricultura de precisão

A crescente globalização da economia e o aumento constante de competitividade nas atividades agropecuárias vêm obrigando o setor agrícola a buscar um melhor controle de informações dentro das áreas cultivadas, uma maior eficiência na utilização de insumos e, principalmente, dos recursos naturais como a água e o solo. Segundo Johann (2004), a agricultura brasileira necessita, assim, do desenvolvimento de tecnologias que possibilitem a competição de seus produtos no mercado mundial, através da ampliação da produtividade, o que é normalmente obtido pelo aumento do uso dos insumos agrícolas, porém, a falta de conhecimentos adequados, assim como de tecnologias inadequadas têm contribuído para a perda de competitividade econômica do setor agrícola e para a degradação ambiental.

Diante da crescente necessidade nos próximos anos em diminuir os custos e aumentar a produtividade das lavouras nas propriedades rurais, está sendo levado em conta os altos preços dos combustíveis, diminuição de terras produtivas e a preservação do meio ambiente, têm direcionado as pesquisas científicas ao desenvolvimento de novas tecnologias e formas de gerenciamento das propriedades rurais. Sendo assim a agricultura de precisão baseia-se no gerenciamento localizado de sistemas agrícolas, utilizando recursos como mapeamento dos fatores de produção, ferramentas de suporte à decisão e aplicação localizada de insumos. Em termos econômicos, a utilização desta tecnologia possibilita a priorização de investimentos em áreas onde o potencial de produção seja mais efetivo, garantindo maior retorno econômico e, do ponto de vista ambiental, a racionalização e a redução do uso de insumos devem ser avaliadas como um dos principais benefícios da agricultura de precisão.

A Agricultura de Precisão é baseada num novo conceito de gerenciamento agrícola, que modifica as antigas técnicas, introduzindo novos instrumentos e ferramentas. Neste contexto, segundo Lamparelli (2001), surge a Agricultura de Precisão, envolvendo o uso das chamadas geotecnologias como sistemas de posicionamento global (GPS – *Global Positioning System*), sistemas informatizados de coleta de dados, sensores remotos locais, orbitais e não orbitais, softwares para tratamento e mapeamento destes dados (Sistema de Informações Georeferenciadas – SIG) e sistemas eletrônicos de acionamento, controle e automação de máquinas agrícolas. A utilização da tecnologia, Agricultura de Precisão, está diretamente relacionada com a variabilidade espacial e temporal de diversas variáveis do solo (composição química e composição física), das plantas (cultivar, densidade de plantio, nutrientes absorvidos, ataque de ervas, fungos, insetos), do clima (temperatura, umidade,

luminosidade, vento), externos (invasão de animais), e gerenciamento de operações que influenciam na produtividade de uma cultura.

A Agricultura de Precisão tem três componentes: captação de dados em uma escala e frequência adequada, interpretação e análise desses dados, gestão e implementação de uma resposta a uma escala espacial e de tempo adequada. É provável que o impacto mais significativo da Agricultura de Precisão ocorra na forma como as decisões de gestão da variabilidade espacial e temporal no sistema produtivo vegetal serão tomadas.

A abundância de definições sobre AP e indicou uma lista de dezenas de definições encontrada na página do Laboratório de Máquinas Agrícolas e Processamento, Universidade Católica da Bélgica e generalizou o conceito como sendo um tipo de agricultura que aumenta o número de decisões corretas por unidade de área e de tempo com benefícios associados em rede afirmou MCBRATNEY (2005). Para Ting (2008), a Agricultura de Precisão é um sistema inteligente poderoso de produção que requer capacidade de coleta, processamento de informações e de tomada de decisões, dispositivos mecatrônicos de controle e acionamento, bem como a capacidade de integrar sinergicamente componentes em sistemas funcionais, sendo assim, a agricultura de precisão é um novo paradigma de gerenciamento agrícola que esta contribuindo para alterar a forma de se praticar agricultura em todo o mundo.

2.4 - Compactação do solo

A compactação do solo é atributo físico amplamente estudado. Vários autores citam seu impacto na produção e produtividade agrícola, nas propriedades físicas do solo e na distribuição e crescimento de raízes (Foloni et al., 2006; Schäffer et al., 2007; Taboada & Alvarez, 2008). 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 LIMA, (2004). A compactação do solo nada mais é do que o aumento da densidade do solo e redução da sua porosidade. O solo se compacta em subsuperfície devido a pressões externas exercidas sobre ele, principalmente quando se encontra num estado elevado de umidade, normalmente chamado de plasticidade e dentre os principais agentes causadores destas forças externas, podemos citar:

- Impacto da gota de chuva;
- Pisoteio do gado em alta lotação de pastagem;

- Operações de preparo de solo em condições inadequadas de umidade;
- Predisposição geomorfológica de alguns tipos de solo se tornarem compactados.

2.5 - Textura do solo

A parte mineral do solo é constituída de partículas unitárias originadas do intemperismo das rochas, de variáveis tamanhos tais como: matacões (>200 mm de diâmetro), calhaus (20 - 200 mm de diâmetro), cascalhos (2,0 - 20 mm de diâmetro), areia (2,0 - 0,05 mm de diâmetro), silte (0,05 - 0,002 mm de diâmetro) e argila (< 0,002 mm de diâmetro).

A textura do solo refere-se às várias proporções de partículas de diferentes tamanhos existentes no solo (menor que 2,0 mm de diâmetro), as quais são expressas pelas classes texturais convencionais, que procuram definir diferentes combinações de argila, silte e areia. Esta se constitui numa das características físicas mais estáveis e representa a distribuição quantitativa das partículas do solo quanto ao tamanho, em campo é avaliada pela sensibilidade ao tato, enquanto em laboratório a determinação é feita pela análise granulométrica.

Para Encide (2005), a textura do solo deve ser uma variável a ser considerada no processo de compactação. Poros maiores geralmente são ocupados por ar, e poros menores por água. Os solos cuja constituição apresenta partículas do mesmo tamanho são menos susceptíveis ao processo de compactação, comparados aos solos onde há mistura uniforme de argila, silte e areia. Isto se deve ao fato de que as partículas de tamanho diferentes se arranjam e preenchem os poros, quando submetidos a uma pressão no solo determinando o atrito entre as partículas e o tipo de ligação entre elas. Em geral, quanto maiores as partículas do solo, menor sua compressibilidade e agregação MACEDO et al. (2010).

A fração areia compreende partículas de dimensões entre 2,0 - 0,05mm, é constituída quase que essencialmente de quartzo, apresenta aspereza ao tato, é responsável pelo aparecimento de macroporos, e, portanto pela aeração do solo, retém pouca água e poucos nutrientes. Já a fração silte é compreendida por partículas de dimensões entre 0,05 - 0,002mm, é constituída em sua maior parte por quartzo, apresenta a sensação de serosidade (sensação de seda) ao tato, promove o aparecimento de poucos poros, podendo causar adensamento do solo, retém pouca água e poucos nutrientes. No caso da fração argila, a mesma compreende partículas com dimensões menores que 0,002mm. Constituída em sua maior parte por minerais de argila, apresenta sensação de untuosidade (sensação de talco) ao tato, promove a estruturação do solo, fazendo com que ocorra o aparecimento de um alto volume de poros, principalmente de microporos, retém muita água e muitos nutrientes.

2.6 - Resistência mecânica do solo à penetração.

O uso intensivo de terras agricultáveis para a produção de alimentos e bioenergia tem causado aceleração do processo de degradação do solo. Este é um problema mundial que tem aumentado devido ao crescente uso das máquinas agrícolas e frequência do tráfego dessas máquinas, em função dos períodos de plantio cada vez menores em detrimento das condições climáticas ou cumprimento de contratos agrícolas por parte dos produtores.

Essa adoção de agricultura intensiva, com uso de máquinas e implementos agrícolas tem gerado um elevado incremento de peso e potência nas máquinas a fim de aumentar a eficiência nas operações, o que pode contribuir para a compactação do solo Ralisch et al. (2008), sendo assim, o tráfego intensivo de máquinas é o principal responsável pelo aumento da densidade e resistência do solo à penetração, Resende silva et al. (2011), diminuição da macroporosidade e condutividade hidráulica Suzuki et al. (2007), resultando na compactação do solo e alterando o meio onde o sistema radicular desenvolve-se MARCHÃO et al. (2007).

A resistência do solo à penetração é uma das propriedades físicas que expressa o grau de compactação, e consequentemente a facilidade com que as raízes penetram no solo FUENTES LLANILLO et al. (2006). A avaliação da compactação do solo é baseada na condição atual em que se encontra o solo, sendo possível identificar as camadas que apresentam restrições a fenômenos de superfície, crescimento e produtividade das culturas (SILVA; REICHERT; REINERT, 2004).

Uma das propriedades físicas importantes para o manejo e estudo da qualidade física dos solos é sua resistência à penetração, uma vez que essa propriedade apresenta-se relacionada com diversos atributos do solo, indicadores do grau de compactação (RIBON & TAVARES FILHO, 2008). A qualidade do solo é função de alguns atributos que promovem o bom desenvolvimento das raízes, tais como: infiltração e movimento de água no perfil, trocas gasosas, atividade biológica e mineralização de carbono. Todos esses atributos são, em parte, relacionados com as propriedades e os processos físicos do solo CARVALHO et al. (2008).

A compactação provoca alteração estrutural do solo devido à reorganização das partículas e de seus agregados, resultando em aumento da densidade, na resistência do solo à penetração e na redução da macroporosidade, impedindo o crescimento e o desenvolvimento radicular das plantas segundo COLLARES et al. (2006).

2.7 - Geoestatística.

O conceito de geoestatística surgiu com os trabalhos de Krige (1951) com dados de concentração de ouro nos quais concluiu que apenas a informação fornecida pela variância seria insuficiente para explicar o fenômeno em estudo, sendo assim, a geoestatística é um conjunto de métodos estatísticos apropriados para analisar um atributo de um fenômeno que tem distribuição contínua sobre uma área geográfica. Era preciso considerar a distância entre as observações sendo assim, a geoestatística leva em consideração a localização geográfica e a dependência espacial CAMARGO et al. (2004 A); LEAL et al. (2010).

A geoestatística permite estabelecer modelos de semivariograma que melhor descreva a variabilidade espacial dos dados, o qual será utilizado no processo de interpolação, possibilitando a geração de uma superfície contínua para a área estudo, expressa através de mapas de isolinhas.

Atualmente a aplicabilidade e a utilização da geoestatística como metodologia de análise de dados no espaço ou no tempo esta difundida em vários ramos da ciência, envolvendo áreas de ciências humanas, biológicas e exatas, em especial, na aplicação crescente na ciência do solo, tornando-se ferramenta adicional no estudo de seus atributos espacialmente correlacionados, exatamente porque incorpora em si a possibilidade de se estudar o comportamento da variabilidade espacial, permitindo a interpretação dos resultados com base na estrutura dessa variabilidade CAVALCANTE et al. (2007).

A análise espacial é composta por um conjunto de procedimentos encadeados cuja finalidade é a escolha de um modelo inferencial que considere explicitamente o relacionamento espacial presente no fenômeno. Os procedimentos iniciais da análise incluem o conjunto de métodos genéricos de análise exploratória e a visualização dos dados, em geral, por meio de mapas. Essas técnicas permitem descrever a distribuição das variáveis de estudo, identificar observações atípicas não só em relação ao tipo de distribuição, mas também em relação aos vizinhos CÂMARA & CARVALHO (2004).

A geoestatística tem sido relatada como uma ferramenta eficiente de suporte à decisão de manejo, pois é utilizada para estudar a variabilidade espacial e temporal de atributos de solo, planta e clima, possibilitando a interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade obtida nos mapas.

2.8 - Variabilidade espacial de atributos físicos do solo.

Um fator que deve ser levado em consideração no planejamento da produção agrícola é a condição inicial do solo. Por isso, tanto a variabilidade espacial quanto a variabilidade temporal dos atributos do solo devem ser incorporadas aos procedimentos e tecnologias aplicados à agricultura. Se a variabilidade espacial não for considerada, pode levar a conclusões errôneas de resultados experimentais e ao inadequado uso das áreas agrícolas. Quando esta é considerada, pode-se tornar instrumento precioso, porque o conhecimento da variabilidade espacial permite correto planejamento e interpretação dos resultados experimentais e sua aplicabilidade nas recomendações de manejo do solo e das culturas agrícolas.

A heterogeneidade é uma característica intrínseca dos solos, porém o cultivo resulta em alterações aumentando ainda mais a variabilidade nos seus atributos (SANTOS et al., 2006). Assim, o conhecimento da variabilidade dos atributos do solo, no espaço e no tempo, é considerado, atualmente, o princípio básico para o manejo localizado das áreas agrícolas, qualquer que seja sua escala Grego & Vieira (2005) e segundo Simões et al. (2006) ressalta que, dentre outros, os atributos físicos do solo influenciam diretamente no crescimento e desenvolvimento das culturas.

A variabilidade de um atributo pode ser classificada de acordo com a magnitude do seu coeficiente de variação, que pode ser: (a) baixa, quando menor que 10 %; (b) média, quando entre 10 e 20 %; (c) alta, quando entre 20 e 30 %; e (d) muito alta, se maior que 30 % de acordo com PIMENTEL-GOMEZ & GARCIA (2002).

2.9 - Semivariogramas

Alguns métodos estimadores geoestatísticos da autocorrelação espacial são usados como ferramentas de continuidade espacial. Para isso existem ferramentas geoestatísticas como o variograma ou semivariograma, co-variograma e o correlograma que são utilizadas para avaliar a magnitude da correlação espacial entre as amostras e sua similaridade ou não com a distância ZIMBACK (2003).

Quando as amostras forem coletadas no campo em duas dimensões e for necessária a interpolação entre locais medidos para a elaboração de mapas de isolinhas, a ferramenta mais indicada para se medir a dependência espacial é o semivariograma segundo FREITAS (2000).

Os semivariogramas expressam o comportamento espacial da variável regionalizada ou de seus resíduos, mostra o tamanho da zona de influência em torno de uma amostra, a variação nas diferentes direções no terreno bem como a continuidade da característica estudada no terreno de acordo com LANDIM (1998), citado por ZIMBACK, (2003). Sendo assim, o semivariograma é uma ferramenta básica de suporte às técnicas de interpolação, que permite representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço JOURNAL & HUIJBREGTS, (1978). É definido como a esperança matemática do quadrado da diferença entre os valores de pontos no espaço, separados pelo vetor distância.

O semivariograma apresenta elementos importantes para interpretação dos dados. O primeiro desses elementos é o efeito pepita (C_0), que revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. Ele indica a variabilidade não explicada, podendo ser originada de erros de medição ou de microvariações não detectadas, sendo muito difícil quantificar qual destas contribui mais fortemente para essa variabilidade, se os erros de medição ou a variabilidade em uma escala menor do que a amostrada CAMARGO et al. (2004 b) sendo assim, o semivariograma constitui-se no instrumento que mede estas semelhanças, mostrando se há ou não autocorrelação espacial.

Passos e Carvalho et al. (2002) acrescentam que o conhecimento do alcance é importante para a determinação do número ótimo de amostragem do solo para fins de fertilidade, visando-se reduzir o esforço de trabalho e o erro-padrão da média, além de aumentar a representatividade da amostra.

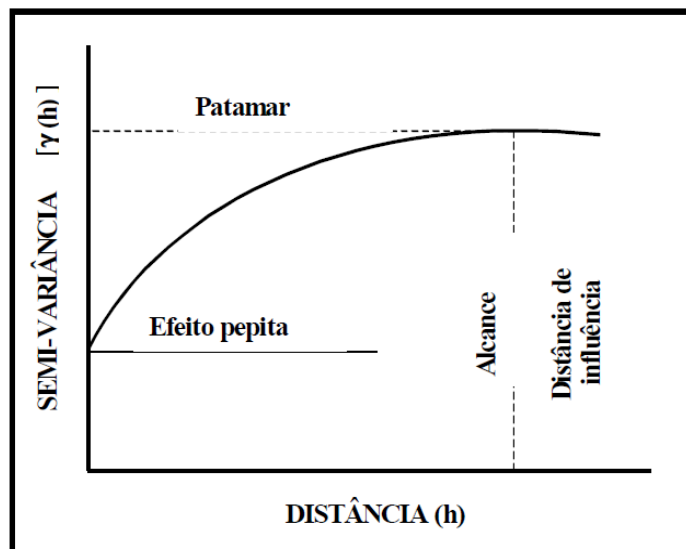


Figura 1 - Semivariograma experimental com indicação dos parâmetros estimados (Nogueira et al., 2000).

Os parâmetros do semivariograma podem ser observados diretamente da Figura 1:

- **Alcance (a):** distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente, NOGUEIRA et al.(2000).
- **Patamar (C):** é o valor do semivariograma correspondente a seu *alcance* (a). Deste ponto em diante, considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras, porque a variância da diferença entre pares de amostras ($\text{Var} [Z(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x}+\mathbf{h})]$) torna-se invariante com a distância, NOGUEIRA et al.(2000).
- **Efeito Pepita (C_0):** idealmente, $g(\mathbf{0})=0$. Entretanto, na prática, à medida que $\mathbf{h}$ tende para 0 (zero), $g(\mathbf{h})$ se aproxima de um valor positivo chamado *Efeito Pepita* (C_0), que revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. Parte desta descontinuidade pode ser também devida a erros de medição, mas é impossível quantificar se a maior contribuição provém dos erros de medição ou da variabilidade de pequena escala não captada pela amostragem, NOGUEIRA et al.(2000).

3. OBJETIVO

3.1 GERAL

- Determinar a relação da resistência mecânica do solo à penetração com a textura em área de colheita mecanizada na cultura da cana-de-açúcar.

3.2 ESPECÍFICO

- Avaliar efeitos diferenciados da variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração nas diferentes profundidades da área em estudo;
- Avaliar os efeitos do grau de mecanização utilizado na colheita e suas implicações sobre o aumento da resistência mecânica do solo à penetração;
- Avaliar a textura do solo na profundidade de 0,11 – 0,20 m.

4 - MATERIAL E MÉTODOS

4.1 - Caracterização da área de estudo e localização

O trabalho foi conduzido em área comercial de cana-de-açúcar com 40 ha em fevereiro de 2012, cuja variedade utilizada na área é RB 92579 em cana planta na fazenda Boa Vista pertencente à Japungu Agroindustrial S/A em Santa Rita – PB nas coordenadas listadas na tabela 1.

Tabela 1 - Coordenadas UTM da área estudada na Usina Japungu em Santa Rita – PB.

PONTOS	ZONA	NORTE	LESTE	ALTITUDE
1	25 M	9239239 S	271009 E	89 m
13	25 M	9238739 S	269811 E	93 m
16	25 M	9239012 S	269713 E	93 m
17	25 M	9239019 S	269716 E	94 m
27	25 M	9239536 S	270933 E	86 m
28	25 M	9239535 S	270937 E	87 m
29	25 M	9239516 S	270947 E	86 m
32	25 M	9239256 S	271033 E	89 m
33	25 M	9239251 S	271034 E	89 m
34	25 M	9239236 S	271003 E	89 m

O município encontra-se localizado na Mesorregião da Mata Paraibana e na Microrregião de João Pessoa com as coordenadas UTM 9211032 S, 282064 E, Zona 25M com altitude de 13metros. A área em estudo abrange o município de Santa Rita – PB, que este, com área total de 727 km², representando 1.2873% da superfície do Estado da Paraíba, pertencente à unidade geoambiental definida Tabuleiros Costeiros. Essa unidade acompanha o litoral de todo o Nordeste e apresenta altitude média de 50 a 100 metros CPRM (2005).

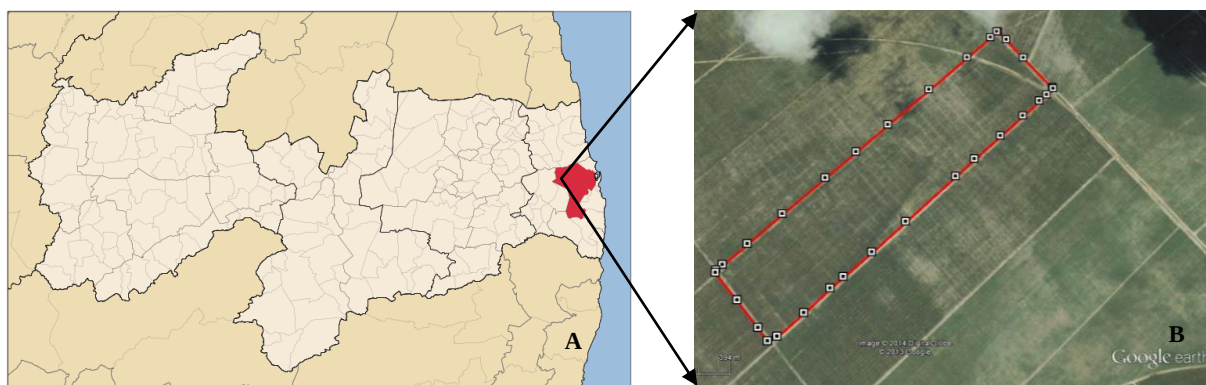


Figura 2 - Mapa do município de Santa Rita – PB (A) e área de estudo (B).

4.2 - Clima e vegetação

De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo As, quente e úmido, com chuvas de outono-inverno, período de estiagem de cinco a seis meses, temperaturas médias variando entre 22 e 26 °C e precipitação pluviométrica anual de 1.500mm com vegetação predominantemente do tipo Floresta Subperenifólia, com partes de floresta subcaducifólia e cerrado/floresta, BRASIL (1972).

4.3 - Relevo e solos

Os solos dessa unidade geoambiental são representados pelos argissolos, solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B textural imediatamente abaixo do A ou E, com argila de atividade baixa ou com argila de atividade alta conjugada com saturação por bases baixa e/ou caráter alítico na maior parte do horizonte B com fragipan, compreendida por platôs de origem sedimentar, que apresentam grau de entalhamento variável, ora com vales estreitos e encostas abruptas, ora abertos com encostas suaves e fundos com amplas várzeas, CPRM (2005).

O trabalho foi conduzido em Argissolo Vermelho Amarelo de textura arenosa, classificado segundo EMBRAPA (2006), característica textural se encontram na Tabela 1.

Tabela 2 - Resultado Textural Argissolo Vermelho Amarelo, Fazenda Boa Vista, Usina Japungu, Santa Rita – PB.

Profundidade (m)	Areia	Silte	Argila
	----- g.kg ⁻¹ -----		
0.11 – 0.20	896.72	36.25	67.03

4.4 - Amostragem da área

O perímetro da área foi obtido através de GPS de navegação modelo Garmin *GPSmap* 60CSx com *datum* WGS84 e sistema de coordenadas UTM. Após a obtenção do perímetro, esses dados foram transferidos ao *software* MapSource[®] em seguida ao *software* Penetrolog[®] e deste ao FalkerMap[®] 7000 para confecção da grade regular da resistência mecânica do solo à penetração (RMSP) para alocar 154 pontos georreferenciados espaçados a cada 50 m, formando uma grade regular de 50 m x 50 m com área de 2.500 m² (Fig. 2). Todo procedimento anterior também foi adotado para determinar a grade regular da textura do solo,

cujos pontos, em número de 68, foram espaçados a cada 77 m e as amostras coletadas na profundidade de 0.11 – 0.20 m em grade regular de 77 m x 77 m com área de 5.929 m² (Fig. 3) e (Fig. 4). Para a amostragem, foi considerado como ponto de coleta a área central da grade regular, tanto para textura (Fig. 3) quanto para resistência mecânica do solo à penetração (Fig. 2). Para a coleta das amostras da textura, a orientação utilizada foi partindo W-E em duas passadas e E-W em outras duas, totalizando quatro passadas (Fig. 3) e a penetrometria teve início na orientação E-W em três passadas e W-E em outras três, totalizando seis passadas (Fig. 2).

4.5 - Penetrômetro eletrônico

Para diagnosticar a compactação, o método indireto adotado é o Índice de Cone (IC), que mede a resistência que o solo exerce em relação à penetração de uma ponta cônica. Para exercer esta penetração são utilizados equipamentos denominados penetrômetros.

Existem no mercado vários tipos e modelos, desde os mais simples, como o penetrômetro de impacto, muito utilizado no Brasil, que mensuram IC através de cálculos indiretos (Beutler et al., 2007); os penetrógrafos mecânicos (Carter, 1967), os penetrômetros mecânicos com manômetro até os mais práticos que coletam e armazenam dados, como os penetrômetros eletrônicos (Molin et al., 2006), operados manual ou hidraulicamente. Para esta pesquisa avaliou-se a resistência mecânica do solo à penetração (RMSP) ao longo do perfil do solo até a profundidade de 20 cm utilizou-se medidor automatizado de compactação do solo Falker SoloTrack[®] PLG5200, com haste e cone tipo 2 com força máxima suportada de 100 kgf e com índice de cone máximo 7.700 kPa, configurado para tomar dados de resistência mecânica do solo à penetração (RMSP) a cada 10 mm ou 1 cm de profundidade com programação para registrar todas as medições inclusive quando ocorre a reversão automática em caso de força excessiva (7.700 kPa). Ao penetrômetro foi acoplado GPS de navegação modelo Garmin GPSmap 60CSx com *datum* WGS84 e sistema de coordenadas UTM para georeferenciamento dos pontos e conectado na porta serial no módulo eletrônico. O protocolo de comunicação com o receptor GPS a ser utilizado é o NMEA 0183, com velocidade de 4.800 bps, 8 bits de dados, 1 stop bit, sem paridade.

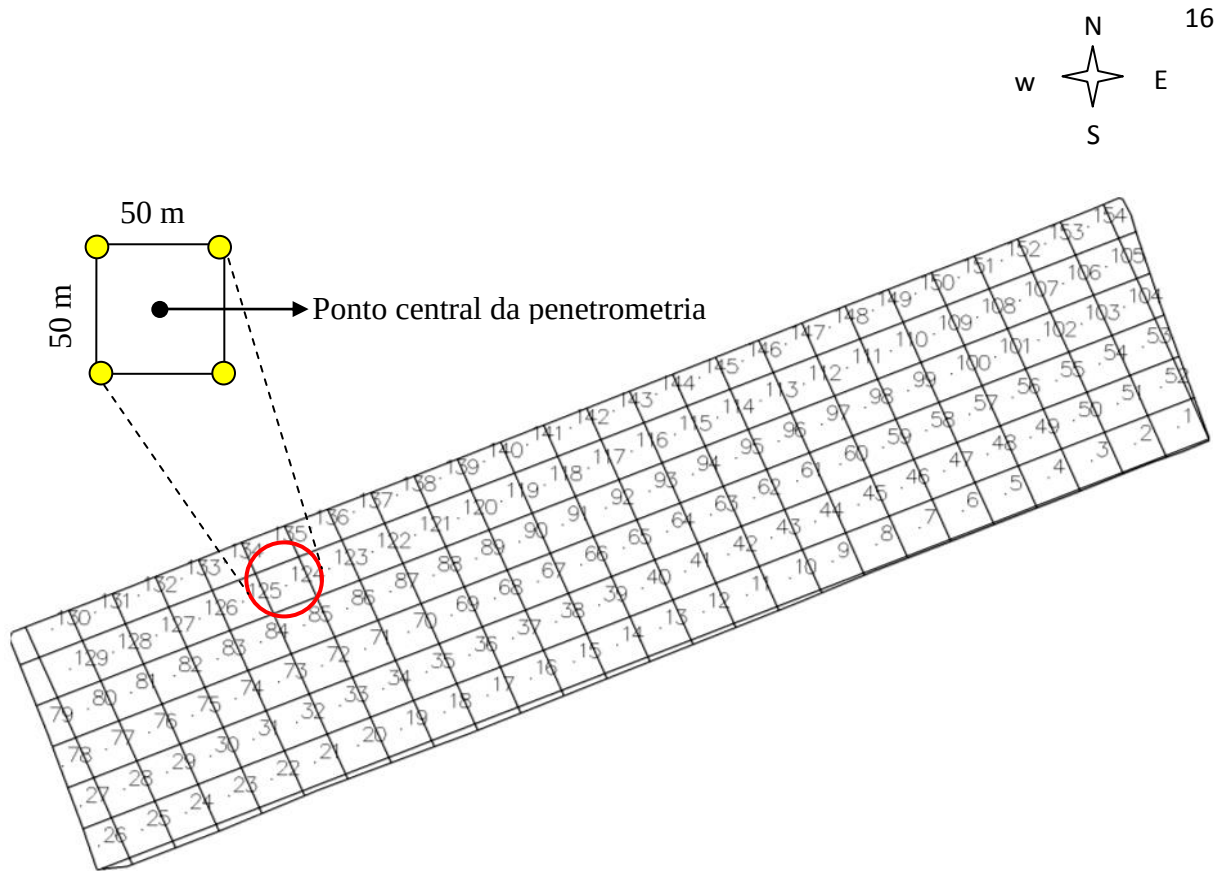


Figura 3 - Grade regular amostral para resistência mecânica do solo à penetração.

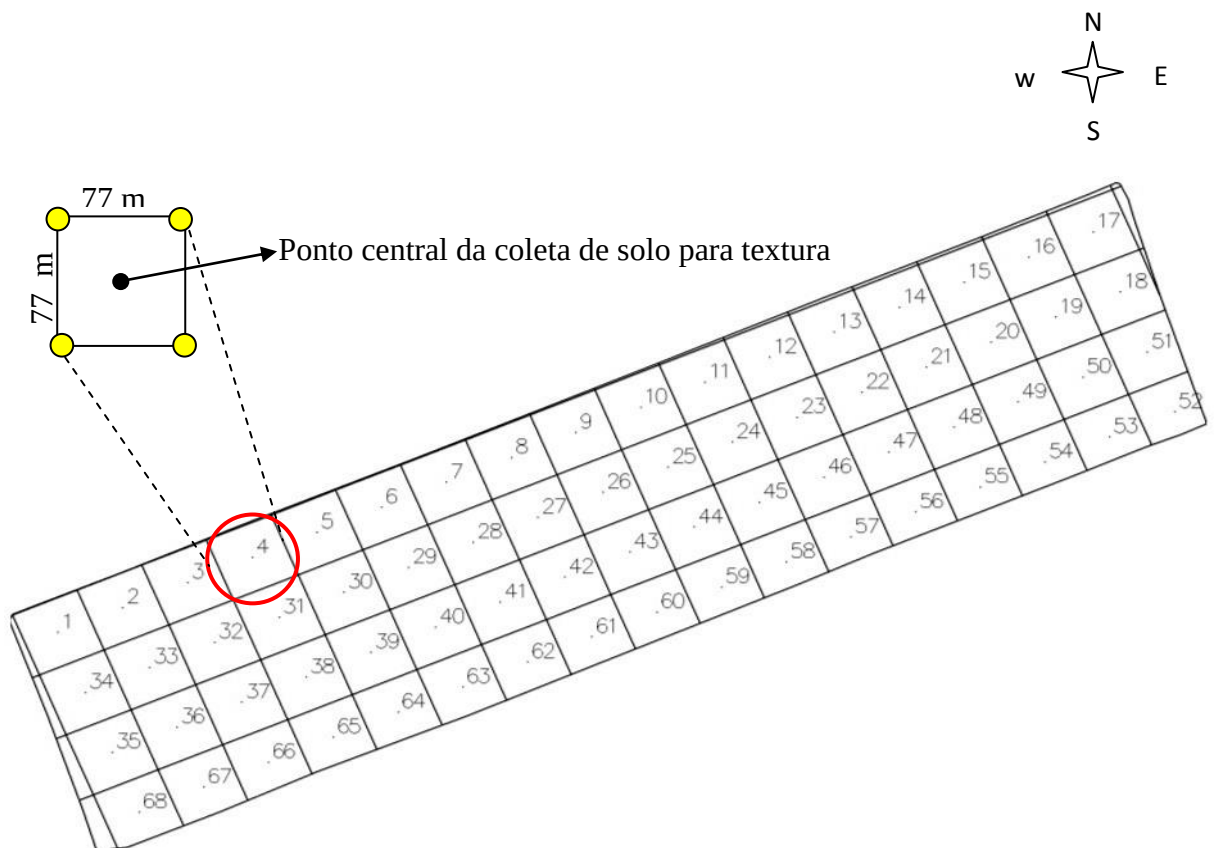


Figura 4 - Grade regular amostral para textura do solo.

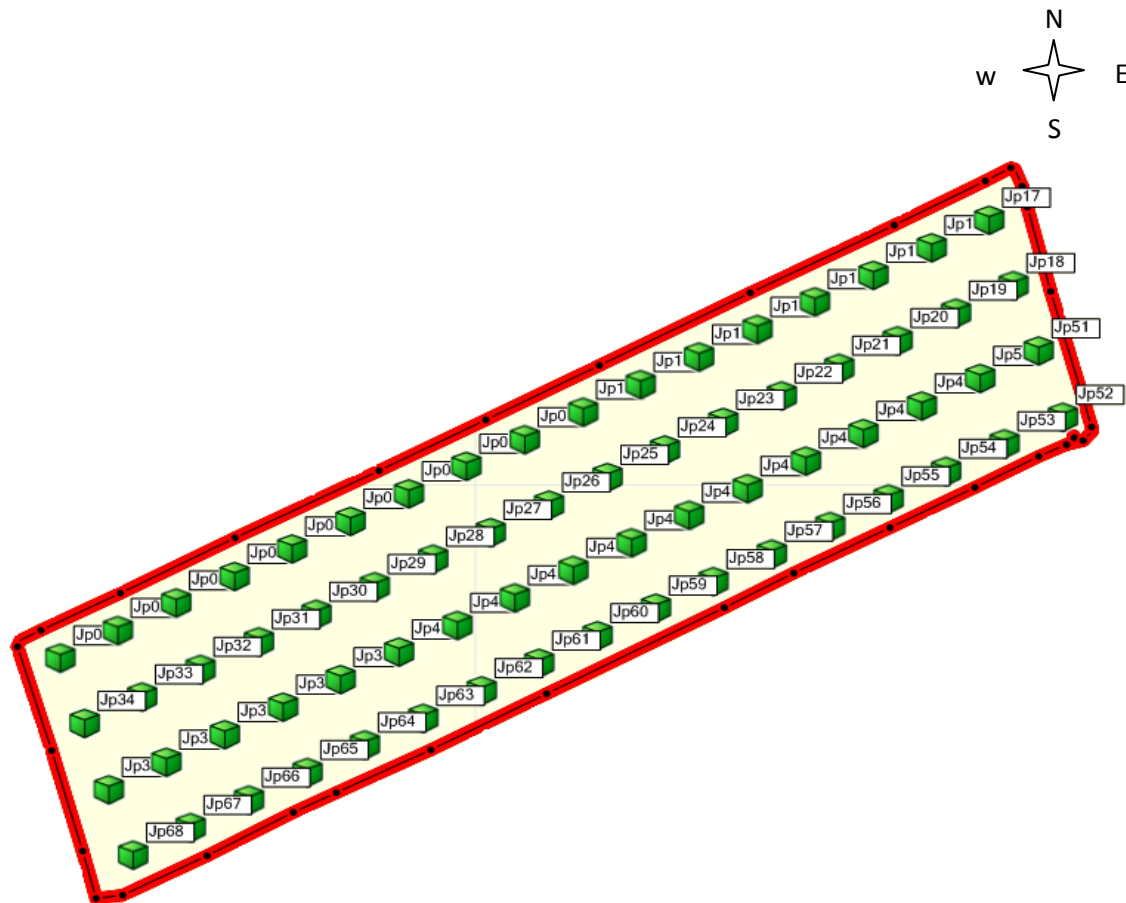


Figura 5 - Pontos para amostragem da textura do solo.

4.6 - Determinações físicas do solo

4.6.1 Textura do solo

As amostras coletadas foram transportadas ao Laboratório de Física do Solo do CCA/UFPB onde a textura foi determinada pelo método do hidrômetro de Bouyoucus (1951), modificado por Day (1965), conforme técnica descrita por Forsythe (1975), utilizando 10 mL de NaOH 1,0 N como dispersante para 40 g de terra fina seca ao ar. A determinação do silte e da argila foi realizada através de leituras com o hidrômetro em função do tempo de sedimentação, enquanto a distribuição granulométrica da fração areia (2,00 - 0,053 mm de diâmetro) foi obtida por tamizagem.

4.6.2 Resistência Mecânica do Solo à Penetração (RMSP)

Para verificar a existência de camadas compactadas, o penetrômetro é o instrumento que, por meio do valor da resistência do solo à penetração, mede a resistência física que o solo oferece a algo que tenta se mover através dele, como uma raiz em crescimento ou uma ferramenta de cultivo (ROBOREDO *et al.*, 2010; BEUTLER *et al.*, 2007).

Para avaliação da resistência mecânica do solo à penetração (RMSP) foi utilizado um medidor automatizado de compactação do solo Falker SoloTrack® PLG5200, com aptidão eletrônica para aquisição de dados configurado para registrar leituras a cada 1 cm de incremento de profundidade cujos dados referentes ao penetrômetro foram extraídos e analisados a uma profundidade de 20 cm, com posterior construção de mapas através do *software* FalkerMap® 7000 que permite visualizar os pontos críticos de resistência a penetração na área em estudo. Em campo foi medida a RMSP em 154 pontos no qual foram eliminados os pontos que não obtiveram a leitura completa na profundidade estudada ao longo de 6 linhas da grade regular amostral como se apresenta na Figura 2.

4.7 - Análise estatística e geoestatística e confecção de mapas temáticos

4.7.1 Análise estatística descritiva dos dados de RMSP e da textura do solo

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

A determinação da estatística descritiva foi executada por meio do software GS+ versão 7.0.

4.7.2 Análise geoestatística dos dados de RMSP e da textura do solo

A análise de dependência espacial foi realizada através da geoestatística. Os semivariogramas experimentais foram estimados com base no melhor modelo ajustado, para o atributo estudado e para a profundidade analisada. A análise geoestatística é baseada na suposição de que medições separadas por distâncias pequenas são mais semelhantes entre si do que aquelas separadas por distâncias maiores. O semivariograma constitui-se no instrumento que mede estas semelhanças, mostrando se há ou não autocorrelação espacial.

Todas as análises geoestatísticas foram realizadas através do software GS+, versão 7.0.

Para analisar o grau de dependência espacial dos atributos em estudo, utilizou-se a classificação de CAMBARDELLA et al. (1994) em que são considerados:

- Dependência espacial forte os semivariogramas que têm um indicativo de dependência espacial (IDE) $\leq 25\%$ do patamar;
- Dependência espacial moderada, quando o indicativo de dependência espacial (IDE) está entre 25 e 75%;

- Dependência fraca, quando o indicativo de dependência espacial (IDE) é $> 75\%$.

IDE = Indicativo de dependência espacial;

$$\text{IDE} = (\gamma(h) \text{ pepita} / \gamma(h) \text{ total}) \times 100$$

$\gamma(h)$ pepita = semivariância do efeito pepita;

$\gamma(h)$ total = semivariância total ou patamar;

4.7.3 Confeção dos mapas temáticos dos atributos físicos resistência mecânica do solo à penetração (RMSP) e textura do solo.

Para a confecção dos mapas de RMSP foi utilizado o software FalkerMap[®] 7000 e para textura utilizou-se o software SURFER[®] 10.0 demo com o objetivo de visualizar as isolinhas das frações areia, silte e argila, bem como as áreas com maiores problemas de RMSP.

5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores analíticos dos atributos físicos do solo avaliados foram utilizados para a confecção dos semivariogramas, análise da variabilidade espacial, bem como seus índices de dependência espacial (IDE). Assim, os modelos foram ajustados aos semivariogramas experimentais considerando-se individualmente cada atributo e também o conjunto de dados que representam à profundidade do solo estudada. Foram utilizados os procedimentos geoestatísticos considerando-se as análises semivariográficas isotrópicas.

Na Tabela 3 são encontrados os parâmetros dos modelos dos semivariogramas ajustados para o atributo físico textura do solo na profundidade 0.11 – 0.20 m e análise da variabilidade espacial, bem como seus índices de dependência espacial (IDE).

Tabela 3 - Parâmetros matemáticos dos semivariogramas para as frações do solo, areia, silte e argila na profundidade de 0.11 – 0.20 m.

Atributo	Efeito Pepita	Patamar	Alcance	Coeficiente de determinação		Índice de Dependência Espacial
	C_0	$(C_0 + C)$	(A) m	R^2	Modelo	IDE
Areia	1.00	695.80	89.00	0.788	Gaussiano	Forte
Silte	1.00	321.80	94.00	0.648	Gaussiano	Forte
Argila	1.00	811.20	84.00	0.846	Gaussiano	Forte

Na análise geoestatística, observa-se que os valores para as frações do solo na tabela 3 apresentaram dependência espacial, uma vez que nenhum deles apresentou efeito pepita puro, no qual observamos que, o semivariograma ajustado foi o modelo Gaussiano para esses atributos. Lima, (2013) trabalhando com análise espacial de atributos físicos do solo em área de encosta obteve o mesmo modelo de semivariograma para a fração areia e argila nesta profundidade e obtendo mesmo IDE forte a esses atributos. Na Tabela 3, observa-se que as variáveis se mostraram com IDE forte segundo a classificação de CAMBARDELLA et al. (1994).

O coeficiente de determinação (R^2), que, lembrando os conceitos de análise de regressão, é uma relação entre a soma de quadrados devido ao modelo ajustado e a soma

de quadrados total (mede a variação dos dados devido ao modelo ajustado em relação à variação total dos dados) e quanto mais próximo da unidade estiver o valor de R^2 melhor será o modelo ajustado. Os atributos areia, silte e argila apresentaram coeficiente de determinação (R^2) de 0.788, 0.648 e 0.846 respectivamente, com média de 0.760. O valor do R^2 para a fração argila diz o quanto da variância é explicado por determinado modelo, ou seja, o R^2 informa que 84,6% da variância é explicado pelo modelo Gaussiano (Tabela 3).

O efeito pepita constitui-se numa medida importante do semivariograma e indica a variabilidade não explicada, que pode ser devida de erros de medida e microvariações não detectadas, considerando a distância de amostragem utilizada CAMBARDELLA et al.(1994), e pode ser expresso como percentagem do patamar, com o objetivo de facilitar a comparação do grau de dependência espacial das variáveis em estudo, formalmente chamado de indicativo da dependência espacial (IDE) e dado por $[(C_0/C_0+C) \times 100]$, conforme TRANGMAR et al. (1985).

O alcance da dependência espacial é outro parâmetro importante no estudo do semivariograma, significando a distância máxima dentro da qual uma determinada variável está correlacionada espacialmente. Dessa forma, seu valor garante que todos os vizinhos, situados dentro de um círculo cujo raio é dado pela sua magnitude, sejam tão semelhantes que podem ser usados para estimar valores de tal variável, que estejam em qualquer outro ponto dentro do seu domínio PASSOS e CARVALHO et al. (2002); VIEIRA e LOMBARDI NETO, (1995). Passos e Carvalho et al. (2002) acrescentam que o conhecimento do alcance é importante para a determinação do número ótimo de amostragem do solo para fins de fertilidade, visando-se reduzir o esforço de trabalho e o erro-padrão da média, além de aumentar a representatividade da amostra.

Os alcances da dependência espacial, determinados para os atributos estudados, variaram de 94.00 m (silte) a 84.00 m (argila) na profundidade 0.11 – 0.20 m que correspondem ao raio da área considerada homogênea para cada variável analisada (Tabela 3). Estes resultados são fundamentais ao planejamento experimental e para áreas comerciais agrícolas onde se busca otimizar os recursos financeiros das empresas e dos produtores rurais. Este parâmetro deve ser levado em consideração em termos de proposta para o manejo e pesquisa, assim como na determinação do número de pontos que devem ser amostrados para se obter uma melhor representatividade da área em questão.

De acordo com Vieira et al. (2011), os valores de alcance podem ser utilizados para se definir o espaçamento de coleta de dados devendo-se ter em mente que o valor de alcance varia entre os diferentes atributos do solo. No entanto, as variáveis apresentadas na tabela 3, o modelo de semivariograma Gaussiano foi o que melhor se ajustou, onde sua curva característica é não linear e sua tangente indica pequena variabilidade para curtas distâncias, apesar de o modelo esférico ser considerado por muitos autores como sendo o que melhor se ajusta aos atributos do solo (CAVALCANTE et al. 2007; SIQUEIRA et al. 2008; GUEDES FILHO et al. 2010).

Warrick & Nielsen (1980), estudando a variabilidade de diversas propriedades do solo, verificaram que, para algumas, a variabilidade expressa pelo coeficiente de variação pode ser inferior a 10 %, enquanto, para outras, pode superar 1.000 %. Classificaram a variabilidade em três níveis: baixa ($CV \leq 12 \%$), média ($12 \% < CV \leq 52 \%$) e alta ($CV > 52 \%$).

Tabela 4 - Estatística descritiva dos atributos físicos do solo: areia, silte e argila.

	Areia g.Kg ⁻¹	Silte g.Kg ⁻¹	Argila g.Kg ⁻¹
Média	896.72	36.25	67.03
Desvio Padrão	27.10	17.33	28.55
Variância	734.46	300.36	814.99
Valor mínimo	821.88	0.00	15.04
Valor Máximo	959.80	76.34	137.60
Nº de dados e dados perdidos	68 (0)	68 (0)	68 (0)
Coeficiente de assimetria e erro padrão	-0.32 (0.29)	0.06 (0.29)	0.42 (0.29)
Coeficiente de curtose e erro padrão	0.42 (0.57)	-0.50 (0.57)	-0.31 (0.57)
Coeficiente de Variação CV (%)	3.02	47.82	42.58

Nota-se que a área apresenta na tabela 4, em média, 896.72 g.Kg⁻¹ de areia com dispersão média em torno desse valor de 27.10 g.Kg⁻¹. Esta dispersão em torno da média representa uma variabilidade de 3.02% (CV=3.02%), mostrando que os dados têm uma baixa dispersão conforme classificação de Warrick & Nielsen (1980).

Verifica-se na tabela 4, que este solo apresentou nesta mesma época de coleta, um teor de silte de 36.25 g.Kg⁻¹, com desvio padrão de 17.33 g.Kg⁻¹, o que representa uma variabilidade de 47.82%, considerada uma média variabilidade dos dados em torno do valor

médio de acordo com a classificação de Warrick & Nielsen (1980). Já para o teor de argila, verificou-se que este solo apresentou um teor de 67.03 g.Kg^{-1} , com desvio padrão de 28.55 g.Kg^{-1} , o que representa também alta variabilidade de 42.58%, considerada também média variabilidade dos dados em torno do valor médio.

Para o atributo areia, o modelo proposto é Gaussiano sendo o melhor ajustado com R^2 0.788 e alcance (A_0) de 89.00 m conforme figura 6. Neste caso, o semivariograma Fig. 6 mostra uma dependência espacial do teor de areia solo de até 89.00 m, ou seja, amostras coletadas a distância inferiores a essa distância possuem dependência espacial e, no caso da utilização de métodos de análises estatísticas que consideram independência entre amostras, à distância de amostragem mínima deveria ser de 89.00 m.

Lima, (2013) em pesquisa realizada para análise espacial de atributos físicos do solo obteve resultados nessa profundidade com o modelo ajustado Gaussiano e IDE moderado o que contradiz em parte ao resultado desse atributo nesta pesquisa em Argissolo.

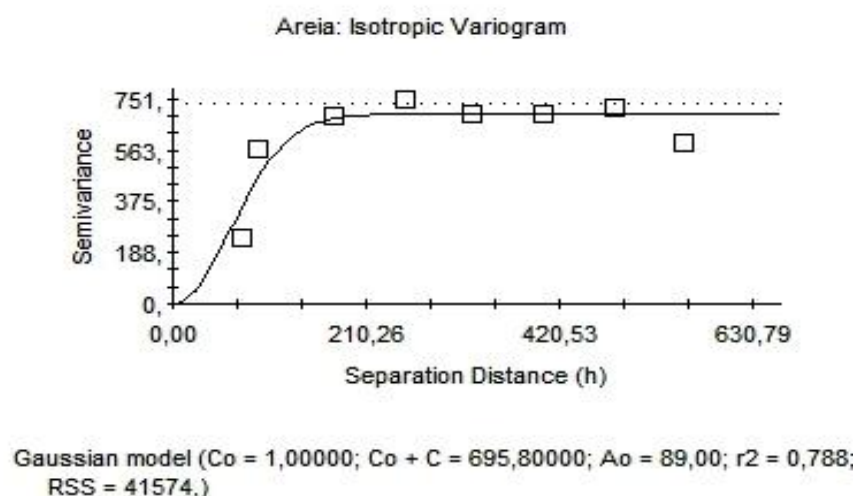


Figura 6 - Variograma do atributo areia na profundidade 0.11 – 0.20 m.

Conforme a figura 7 não se observa tendências de concentração de valores em posições específicas da área e também não ocorre sentido preferencial na distribuição dos dados, tal fato é um primeiro indicativo de que a distribuição espacial dessa variável nesta área é aleatória e isotrópica, e na figura 8 observamos o mapa de isolinhas para a fração areia da área estudada.

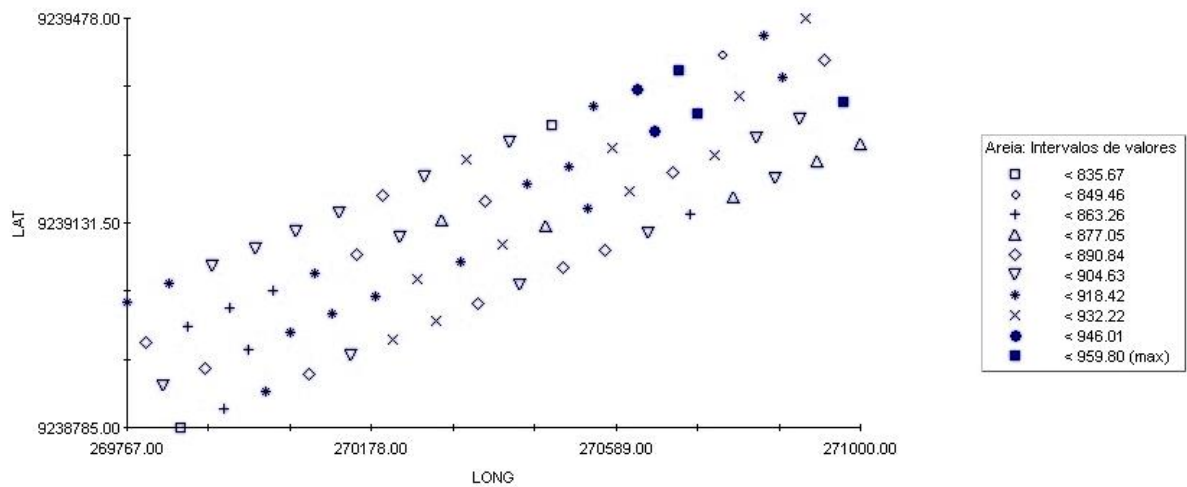


Figura 7 - Distribuição da fração areia no intervalo de valores em g.Kg^{-1} .

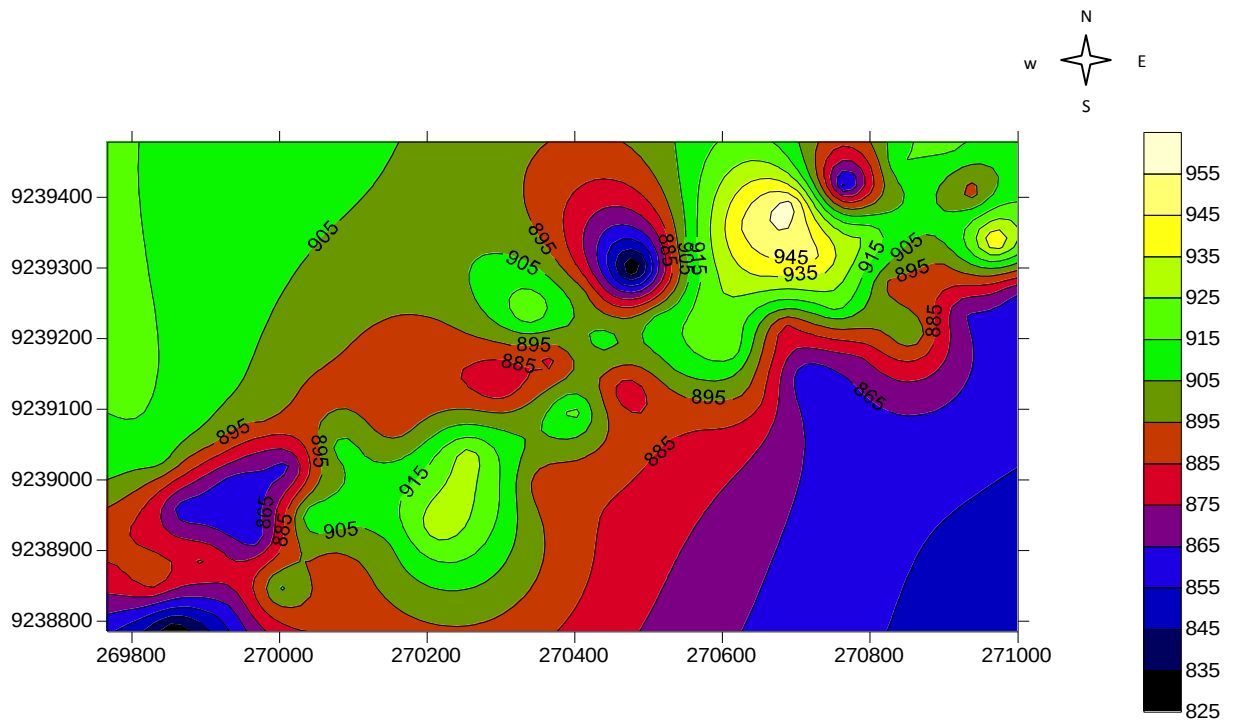


Figura 8 - Mapa das isolinhas da fração areia g.Kg^{-1} .

Para o atributo silte, o modelo proposto também é o Gaussiano, sendo o melhor ajustado, com R^2 0.648 e alcance (A_0) de 94.00 m conforme figura 9. Neste caso, o semivariograma (Figura 9) mostra uma dependência espacial do teor de silte solo de até 94.00 m, ou seja, amostras coletadas a distância inferiores a essa distância possuem dependência espacial e, no caso da utilização de métodos de análises estatísticas que consideram independência entre amostras, à distância de amostragem mínima deveria ser de 94.00 m.

Lima, (2013) em pesquisa realizada para análise espacial de atributos físicos do solo obteve resultados nessa profundidade, obteve como modelo ajustado Esférico e IDE moderado o que contradiz em parte ao resultado desse atributo nesta pesquisa em Argissolo.

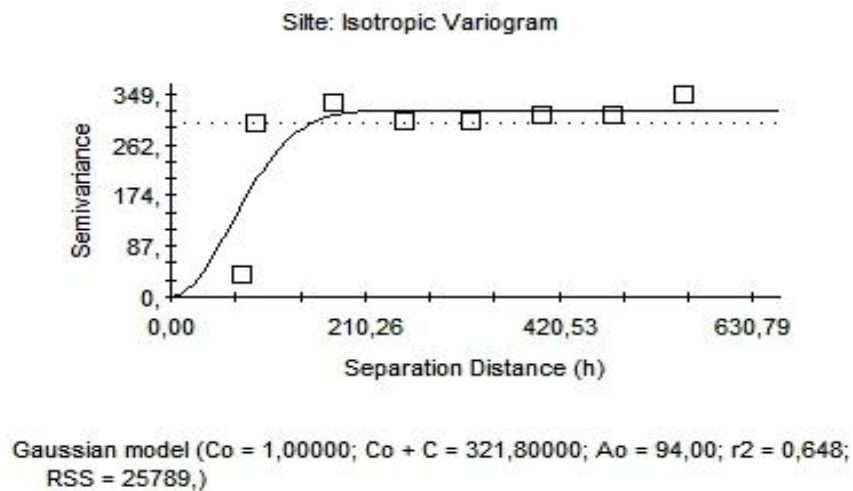


Figura 9 - Variograma do atributo silte na profundidade 0.11 – 0.20 m.

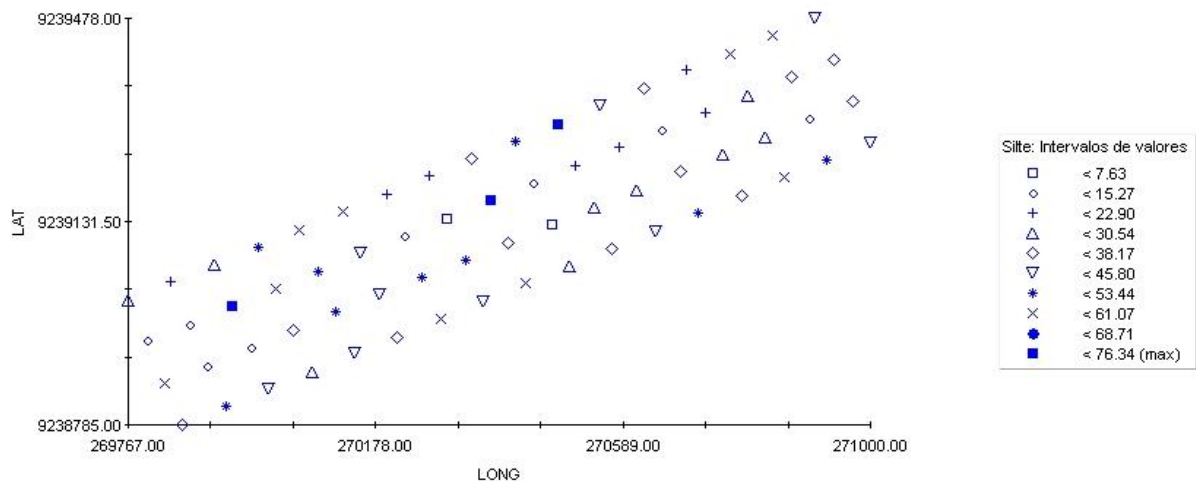


Figura 10 - Distribuição da fração silte no intervalo de valores em g.Kg^{-1} .

Conforme a figura 10 não se observa tendências de concentração de valores em posições específicas da área e também não ocorre sentido preferencial na distribuição dos dados, tal fato é um primeiro indicativo de que a distribuição espacial dessa variável nesta área é aleatória e isotrópica, e na figura 11 observamos o mapa de isolinhas para a fração silte da área estudada.

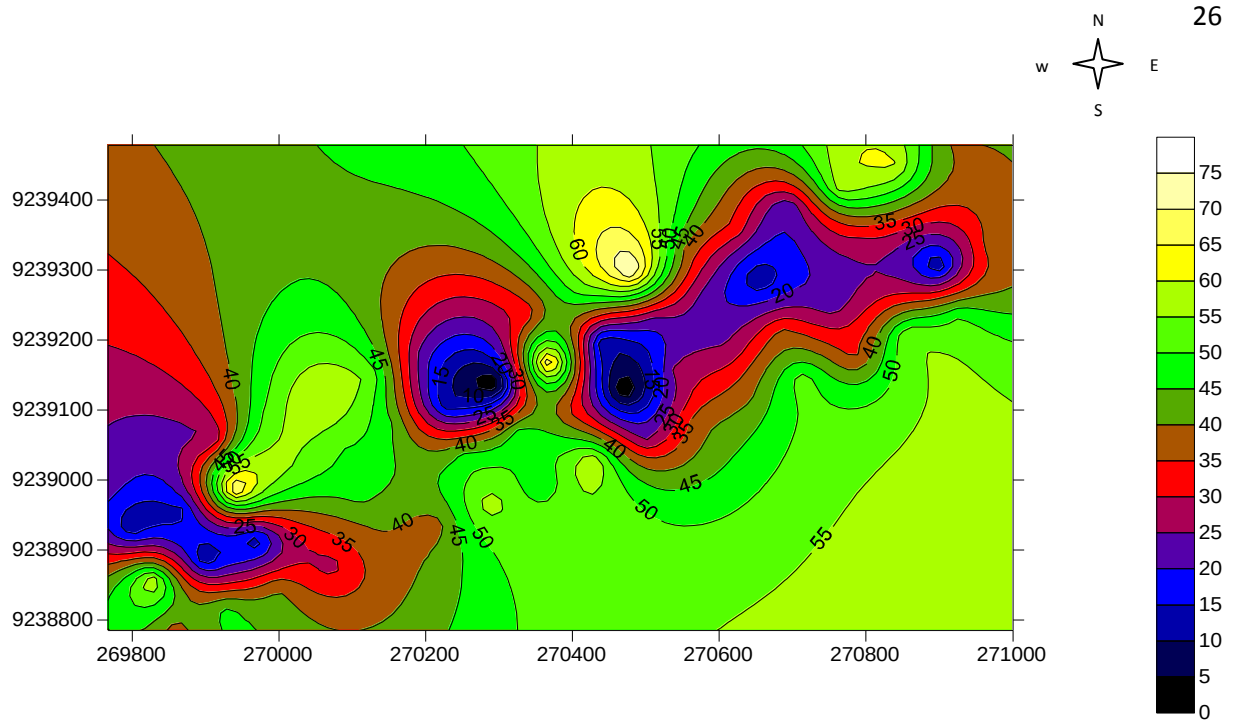


Figura 11 - Mapa das isolinhas da fração silte g.Kg^{-1} .

Para o atributo argila, o modelo proposto também é Gaussiano, sendo o melhor ajustado, com R^2 0.846 e alcance (A_0) de 84.00 m conforme figura 12. Neste caso, o semivariograma Fig. 12 mostra uma dependência espacial do teor de areia solo de até 84.00 m, ou seja, amostras coletadas a distância inferiores a essa distância possuem dependência espacial e, no caso da utilização de métodos de análises estatísticas que consideram independência entre amostras, à distância de amostragem mínima deveria ser de 84.00 m.

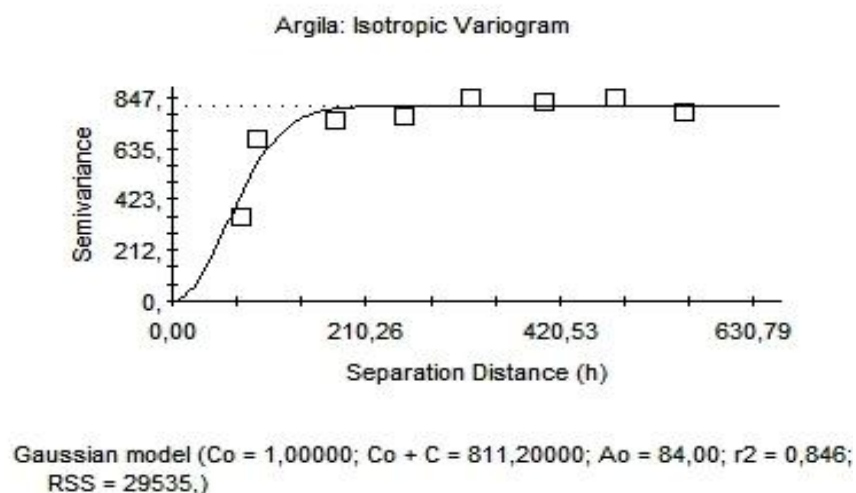


Figura 12 - Variograma do atributo argila na profundidade 0.11 – 0.20 m.

Conforme a figura 13 não se observa tendências de concentração de valores em posições específicas da área e também não ocorre sentido preferencial na distribuição dos dados, tal fato é um primeiro indicativo de que a distribuição espacial dessa variável nesta

área é aleatória e isotrópica, e na figura 14 observamos o mapa de isolinhas para a fração argila da área estudada.

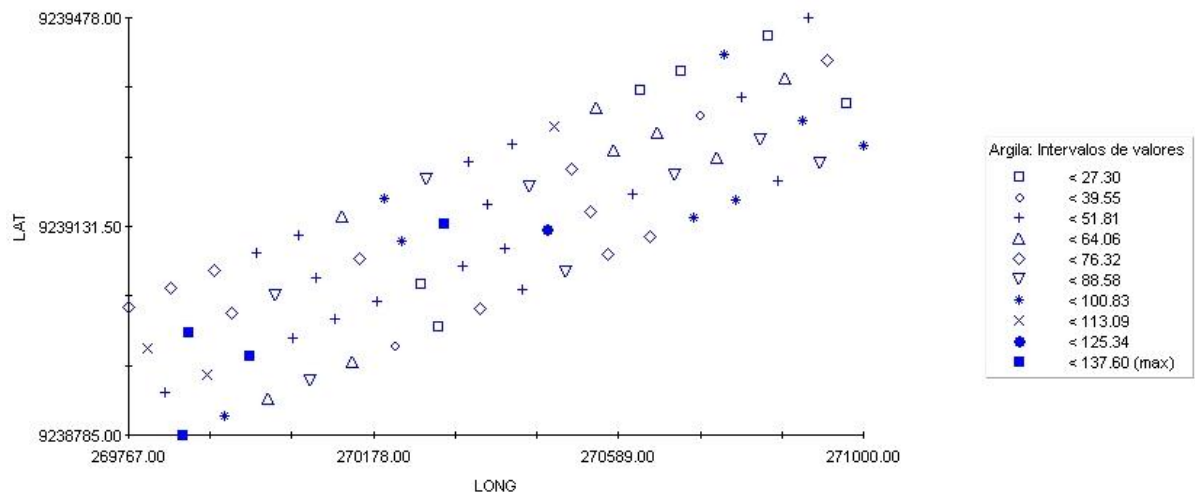


Figura 13 - Distribuição da fração argila no intervalo de valores em g.Kg^{-1} .

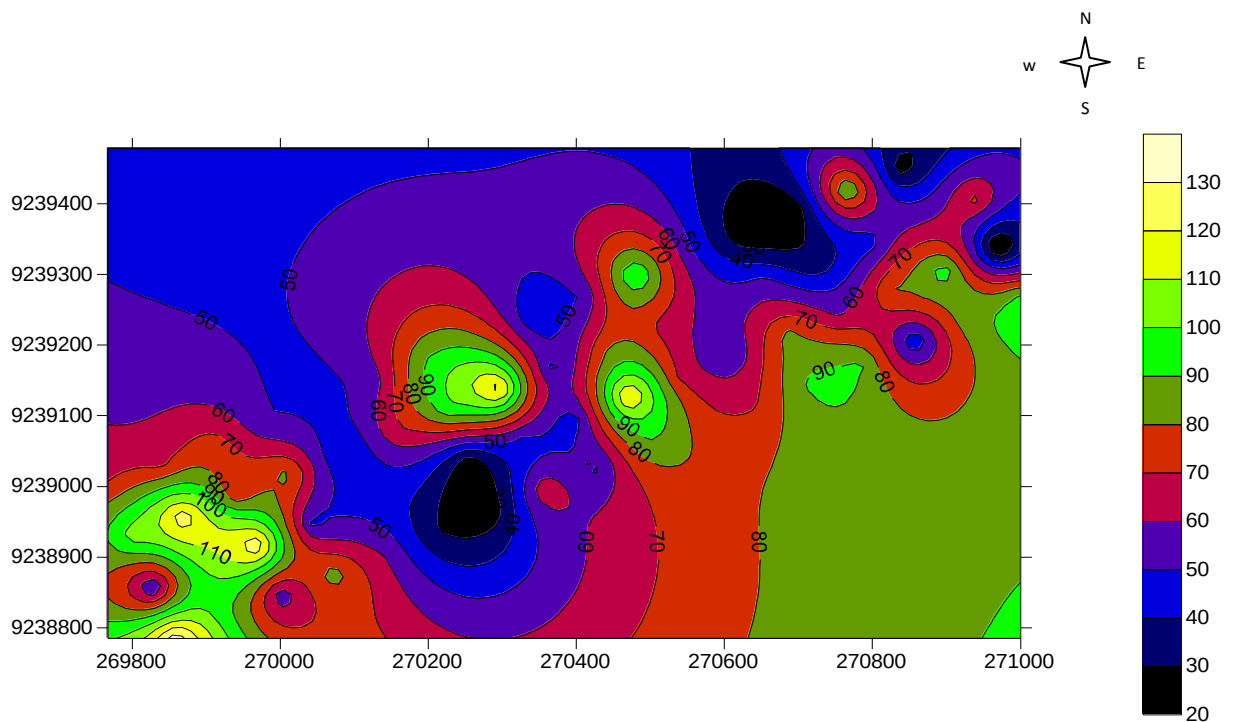


Figura 14 - Mapa das isolinhas fração argila em g.Kg^{-1} .

Observa-se que todos os atributos físicos do solo apresentaram dependência espacial, uma vez que nenhum deles apresentou efeito pepita puro.

Para o atributo resistência mecânica do solo à penetração na profundidade 0.01 – 0.05 m o modelo proposto é o modelo exponencial com alcance (A_0) de 50 m, sendo o melhor

ajustado, com R^2 0.470 conforme figura 15. Neste caso, o semivariograma (Figura 15) mostra uma dependência espacial da RMSP de até 50.00 m, ou seja, leituras coletadas a distância inferiores a essa distância possuem dependência espacial e, no caso da utilização de métodos de análises estatísticas que consideram independência entre amostras, à distância de leitura mínima deveria ser de 50.00 m.

Gonzaga, (2012) trabalhando com variabilidade espacial de atributos físicos em latossolo amarelo não obteve dependência espacial para RMSP na área pesquisada, mas obteve como resultado o efeito pepita puro EPP. Portanto, informa que a distribuição espacial da variável nesta área é aleatória e as amostras para a malha amostrada são independentes, ou seja, a dependência espacial, se existir, será manifestada à distância menor do que o menor espaçamento entre amostras (CARVALHO et al., 2008).

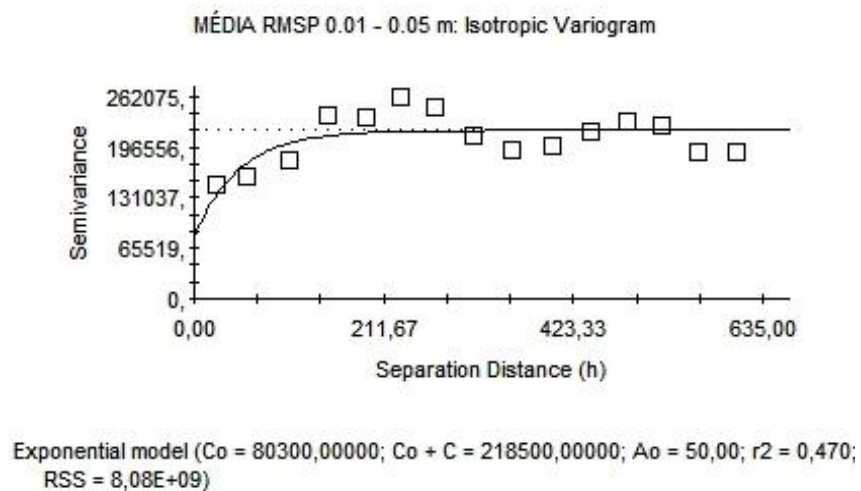


Figura 15 - Variograma do atributo RMSP na profundidade 0.01 – 0.05 m.

Conforme a figura 16 não se observa tendências de concentração de valores em posições específicas da área e também não ocorre sentido preferencial na distribuição dos dados, tal fato é um primeiro indicativo de que a distribuição espacial dessa variável nesta área é aleatória e isotrópica.

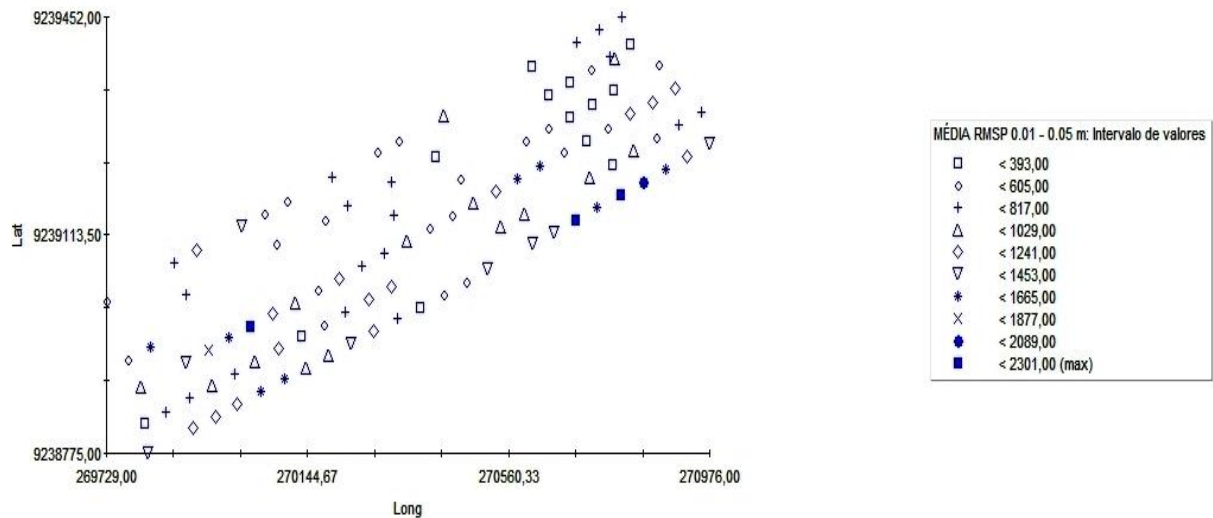


Figura 16 - Distribuição da RMSP 0.01 – 0.05 m no intervalo de valores em kPa.

O atributo resistência mecânica do solo à penetração (RMSP) na profundidade 0.06 – 0.10 m o modelo proposto é o modelo esférico com alcance (A_0) de 161.00 m sendo o melhor ajustado, com R^2 0.768 conforme figura 17. O semivariograma (Figura 17) mostra uma dependência espacial de até 161.00 m, ou seja, leituras coletadas a distância inferiores a essa distância possuem dependência espacial e, no caso da utilização de métodos de análises estatísticas que consideram independência entre amostras, à distância de leitura mínima deveria ser de 161.00 m.

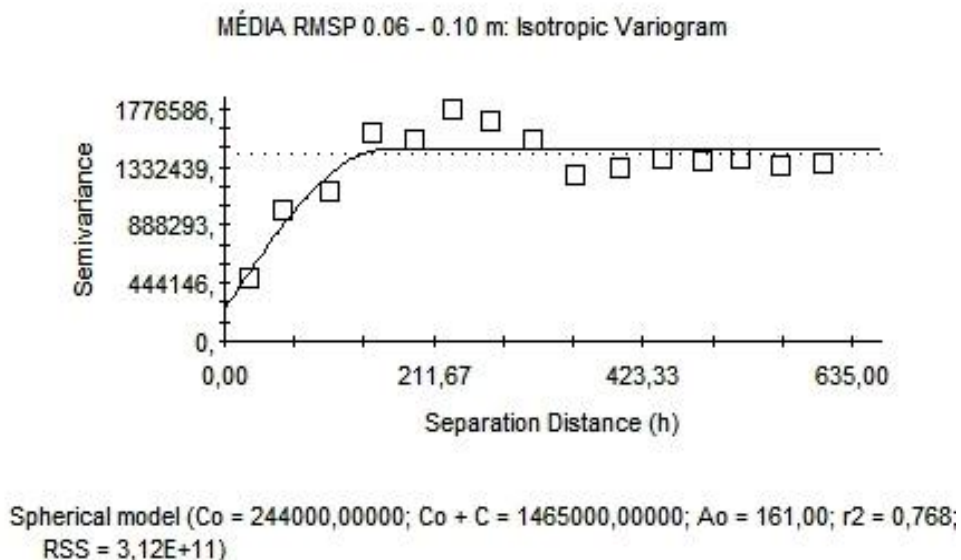


Figura 17 - Variograma do atributo RMSP na profundidade 0.06 – 0.10 m.

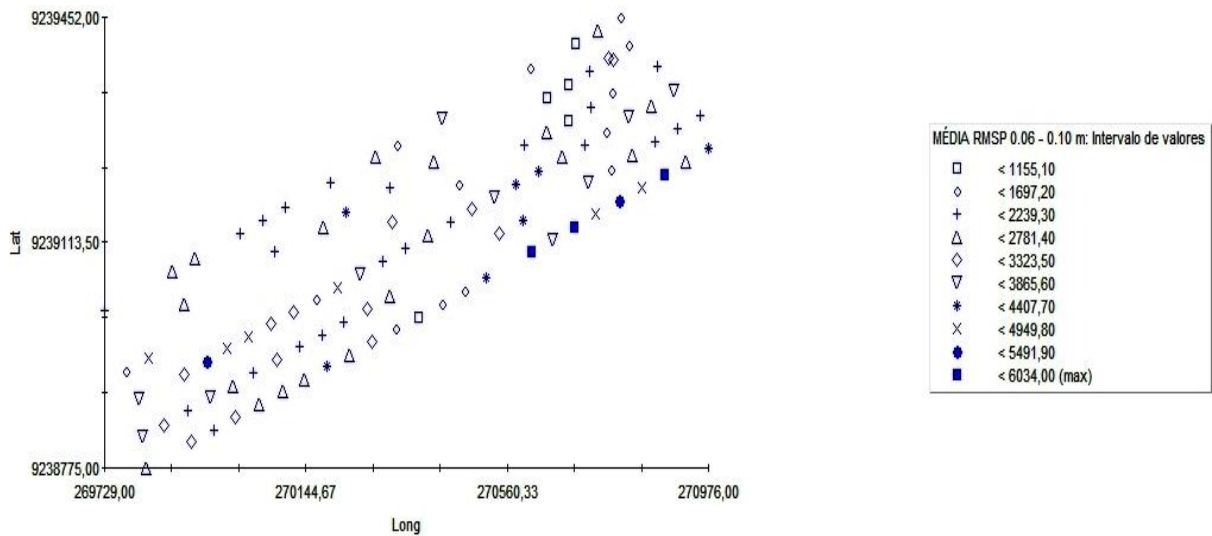


Figura 18 - Distribuição da RMSP 0.06 – 0.10 m no intervalo de valores em kPa.

Conforme a figura 18 não se observa tendências de concentração de valores em posições específicas da área e também não ocorre sentido preferencial na distribuição dos dados, tal fato é um primeiro indicativo de que a distribuição espacial dessa variável nesta área é aleatória e isotrópica.

A resistência mecânica do solo à penetração na profundidade 0.11 – 0.15 m o modelo proposto é o modelo exponencial com alcance (A_0) de 17.00 m, sendo o melhor ajustado, com R^2 0.109 conforme figura 19. Neste caso, o semivariograma (Figura 19) mostra uma dependência espacial de até 17.00 m, ou seja, leituras coletadas a distância inferiores a essa distância possuem dependência espacial e, no caso da utilização de métodos de análises estatísticas que consideram independência entre amostras, à distância de leitura mínima deveria ser de 17.00 m.

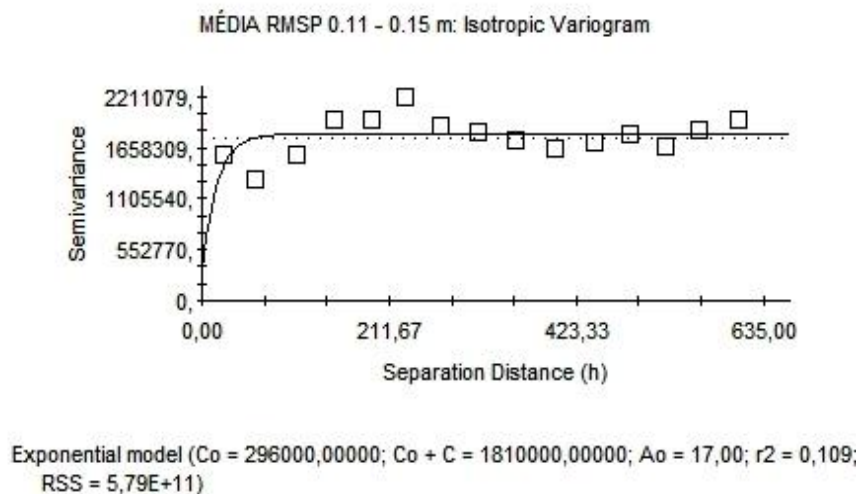


Figura 19 - Variograma do atributo RMSP na profundidade 0.11 – 0.15 m.

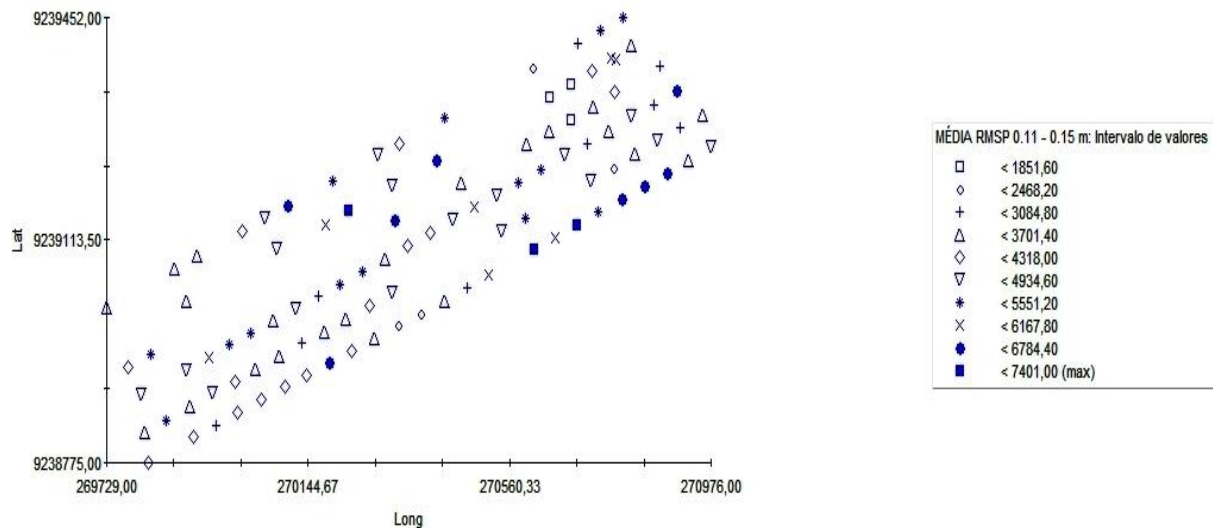


Figura 20 - Distribuição da RMSP 0.11 – 0.15 m no intervalo de valores em kPa.

Conforme a figura 20 não se observa tendências de concentração de valores em posições específicas da área e também não ocorre sentido preferencial na distribuição dos dados, tal fato é um primeiro indicativo de que a distribuição espacial dessa variável nesta área é aleatória e isotrópica.

A resistência mecânica do solo à penetração na profundidade 0.16 – 0.20 m o modelo proposto é o modelo esférico com alcance (A_0) de 249.00 m, sendo o melhor ajustado, com R^2 0.861 conforme figura 21. O semivariograma (Figura 21) mostra uma dependência espacial de até 249.00 m, ou seja, leituras coletadas a distância inferiores a essa distância possuem dependência espacial e no caso da utilização de métodos de análises estatísticas que consideram independência entre amostras à distância mínima deve ser de 249.00 m.

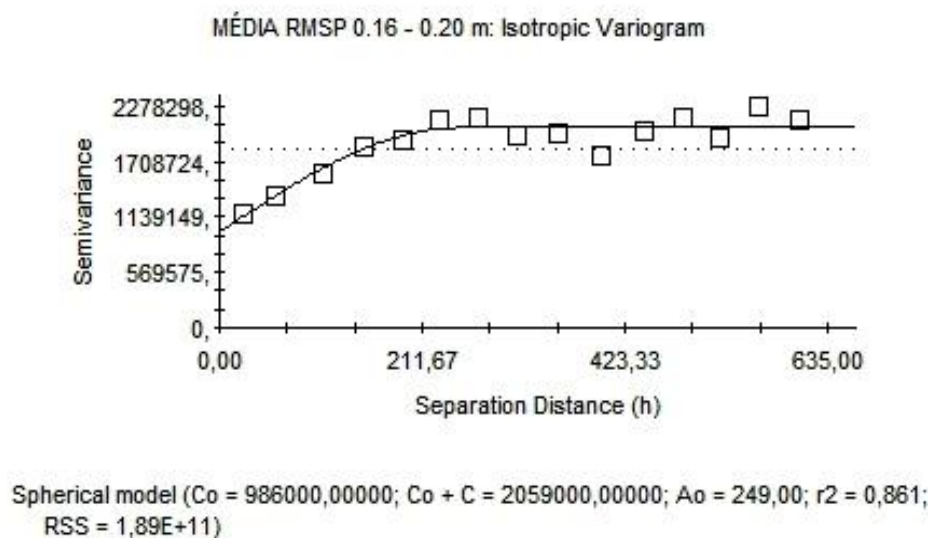


Figura 21 - Variograma do atributo RMSP na profundidade 0.16 – 0.20 m.

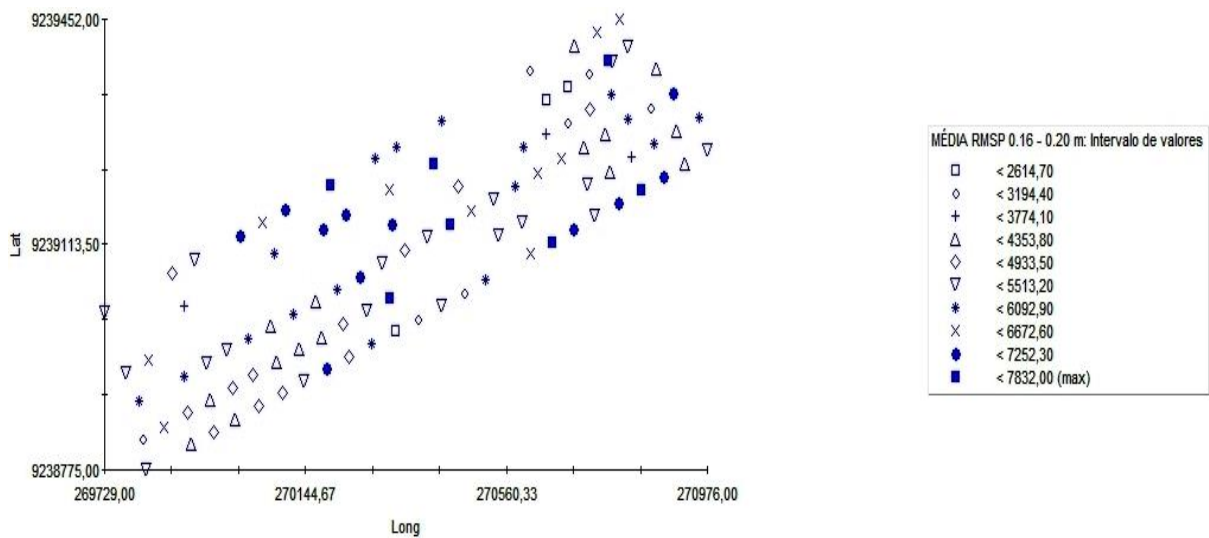


Figura 22 - Distribuição da RMSP 0.16 – 0.20 m no intervalo de valores em kPa.

Conforme a figura 22 não se observa tendências de concentração de valores em posições específicas da área e também não ocorre sentido preferencial na distribuição dos dados, tal fato é um primeiro indicativo de que a distribuição espacial dessa variável nesta área é aleatória e isotrópica.

Na Tabela 5, observa-se que o atributo resistência mecânica do solo à penetração se mostra com dependência forte, moderada e fraca segundo a classificação de CAMBARDELLA et al. (1994).

Tabela 5 - Estimativa dos parâmetros ajustados aos semivariogramas para o atributo físico resistência mecânica do solo à penetração.

Profundidade (m)				Coeficiente de Determinação		Índice de Dependência Espacial
	Efeito Pepita	Patamar	Alcance	R ²	Modelo	IDE
	C ₀	(C ₀ + C)	(A) m			
0.01 – 0.05	80300.00	218500.00	50.00	0.470	Exponencial	Moderada
0.06 – 0.10	244000.00	156500.00	161.00	0.768	Esférico	Fraca
0.11 – 0.15	296000.00	1810000.00	17.00	0.109	Exponencial	Forte
0.16 – 0.20	986000.00	2059000.00	249.00	0.861	Esférico	Moderada

Na análise geoestatística, observa-se que os valores para a resistência mecânica do solo à penetração na tabela 5 apresentaram dependência espacial, uma vez que nenhum deles

apresentou efeito pepita puro, no qual observamos que, o semivariograma ajustado foi o modelo Esférico e Exponencial para esse atributo. Lima, (2013) trabalhando com análise espacial de atributos físicos do solo em área de encosta obteve o mesmo modelo de semivariograma para a RMSP nesta profundidade.

A resistência e a resiliência do solo a determinada prática agrícola depende da textura e da mineralogia do solo (SEYBOLD; HERRICK; BREJDA, 1999). O teor e o tipo de argila também afetam o funcionamento compressivo do solo, determinando, portanto, a profundidade de transmissão e a persistência da compactação (McBRIDE; WATSON, 1990).

Assim, quanto maior o teor de argila, maior a profundidade a qual a pressão é transmitida e maior a espessura da camada compactada (HORN, 1988). Dias Junior e Miranda (2000), trabalhando com solos da região de Lavras, MG, Latossolo Vermelho- Amarelo distrófico (LV), Latossolo Vermelho-Escuro distrófico (LE); Latossolo Roxo distrófico (LR), Podzólico Vermelho-Amarelo distrófico (PV) e Cambissolo distrófico (Cd), coletando amostras deformadas na profundidade de 0 - 30 cm, observaram que os valores das densidades máximas atingidas pelos solos obedeceram a seguinte ordem decrescente de valores: $Cd > LV > PV > LE > LR$. Esse aumento da densidade do solo máxima segue a mesma tendência da fração areia e pode ser devido à maior capacidade de empacotamento das partículas do solo devido à forma irregular dos grãos de areia.

Assim, com base nos resultados do ensaio de Proctor normal, espera-se que o Cambissolo tenha problemas de compactação a umidades mais baixas do que os demais solos, enquanto o Latossolo Roxo atingirá a sua densidade máxima a maiores umidades do que os outros. Esse fato pode constituir uma vantagem em relação ao tempo disponível para a realização das operações motomecanizadas necessárias para o preparo do solo em condições adversas de umidade.

Resultados similares foram encontrados por Ohu, Ayotamuno e Folorunso (1987), que observaram que solos com classe textural areia franca são mais susceptíveis à compactação do que os solos franco-arenosos, devido ao teor de areia do primeiro ser maior o que corroboram com os resultados dessa pesquisa.

Nota-se que a tabela 6 na profundidade 0.01 – 0.05 m apresentou média 872.64 kPa de RMSP com dispersão média em torno desse valor de 469.08 kPa. Esta dispersão em torno da média representa uma de variação de 53.75%, considerado alto, mostrando que os dados têm uma alta dispersão conforme classificação de Warrick & Nielsen (1980).

Tabela 6 - Estatística descritiva do atributo físico do solo: Resistência Mecânica do Solo à Penetração (RMSP).

Profundidade	0.01 – 0.05 m	0.06 – 0.10 m	0.11 – 0.15 m	0.16 – 0.20 m
Média	872.64	2733.40	4287.12	5264.99
Desvio Padrão	469.08	1197.31	1324.03	1365.58
Variância	220039.52	1433558.53	1753059.91	1840301.60
Valor mínimo	181.00	613.00	1235.00	2035.00
Valor Máximo	2301.00	6034.00	7401.00	7832.00
Nº de dados e dados perdidos	104 (0)	104 (0)	104 (0)	104 (0)
Coef. assimetria e erro padrão	0.85 (0.24)	0.71 (0.24)	0.10 (0.24)	-0.24 (0.24)
Coef. curtose e erro padrão	0.46 (0.47)	0.04 (0.47)	- 0.35 (0.47)	- 0.49 (0.47)
CV (%)	53.75	43.80	28.78	25.76

Verifica-se na tabela 6 para as profundidades 0.06 – 0.10; 0.11 – 0.15; 0.16 – 0.20 m apresentam média de 2733.40 kPa, 4287.12 kPa e 5264.99 kPa com dispersão média em torno desse valor de 1197.31 kPa, 1324.03 kPa e 1365.58 kPa com variação de 43.80%, 28.78% e 25.76% respectivamente, sendo classificada como média variabilidade conforme classificação de WARRICK & NIELSEN (1980).

A variabilidade espacial nos atributos do solo pode ser influenciada pelos seus fatores intrínsecos (fatores de formação, que são o material de origem, relevo, clima, organismos e tempo) e pelos fatores extrínsecos, normalmente relacionados com as práticas de manejo, CARVALHO et al.(2003). Usualmente, uma forte dependência espacial nos atributos do solo é atribuída aos fatores intrínsecos CAMBARDELLA et.al.(1994). Nas figuras 23, 24, 25 e 26 observamos os mapas de resistência mecânica do solo à penetração com seus respectivos percentuais.

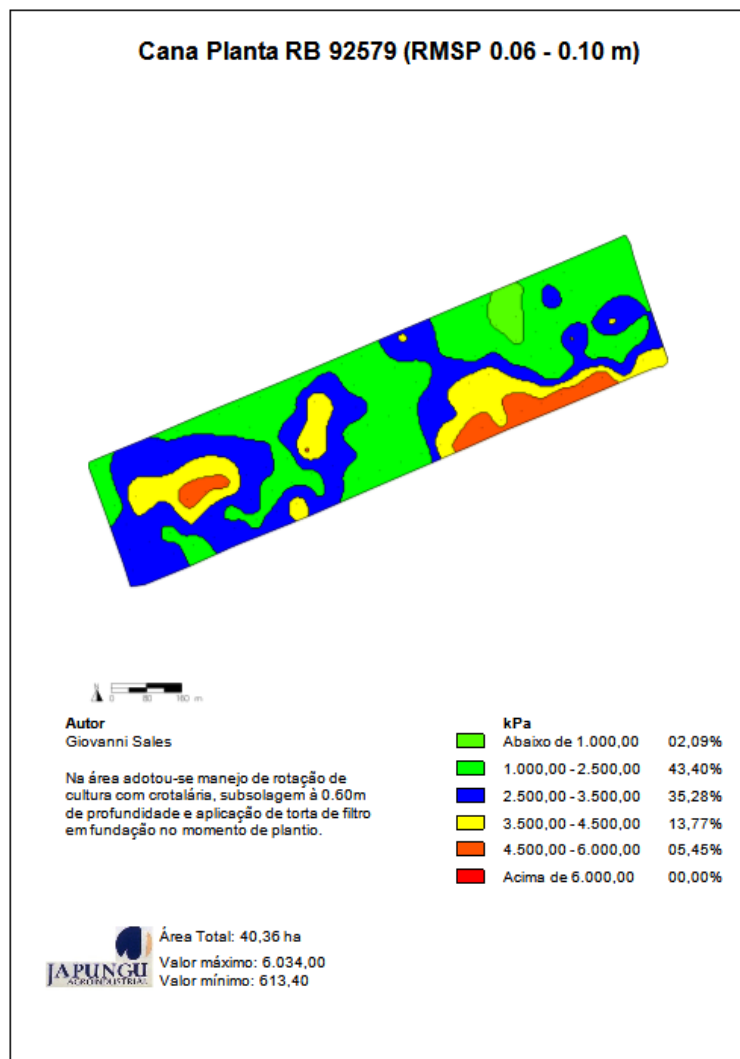


Figura 24 - Mapa de RMSP na profundidade 0.06 – 0.10 m.

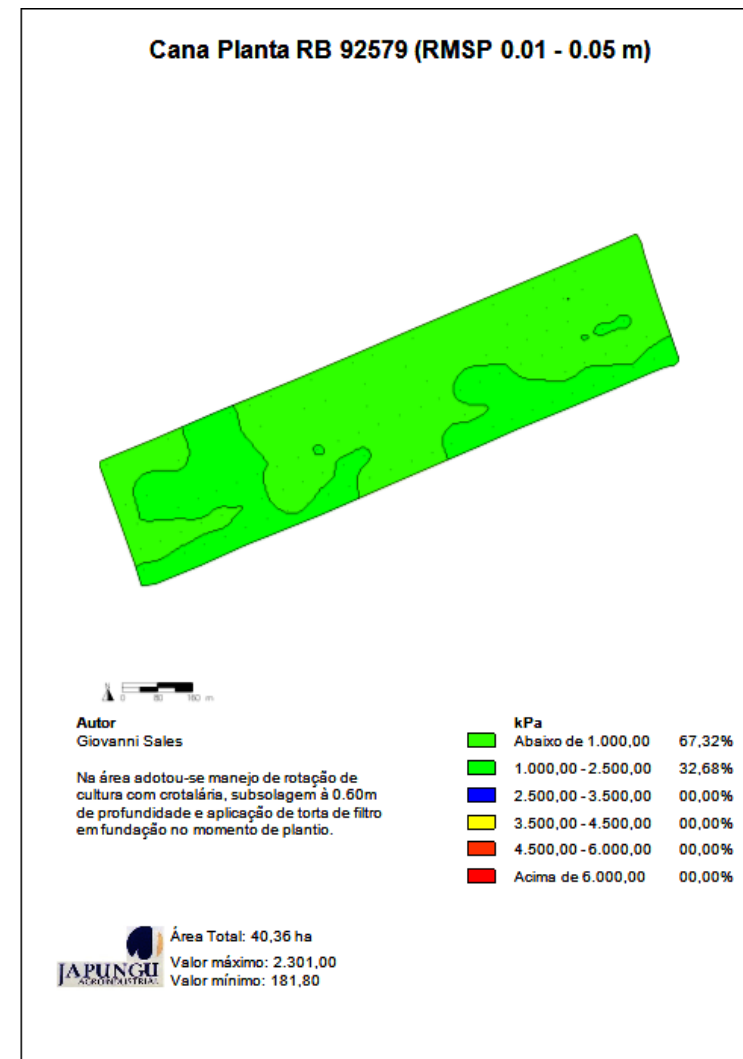


Figura 23 - Mapa de RMSP na profundidade 0.01 – 0.05 m.

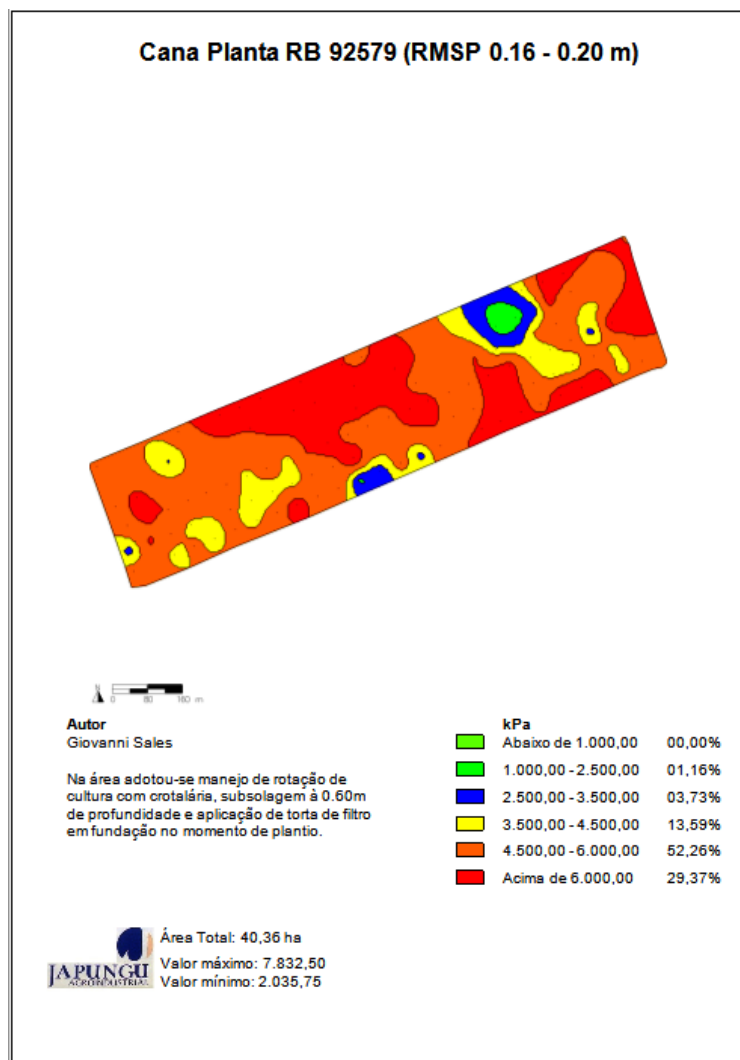


Figura 26 - Mapa de RMSP na profundidade 0.16 – 0.20 m.

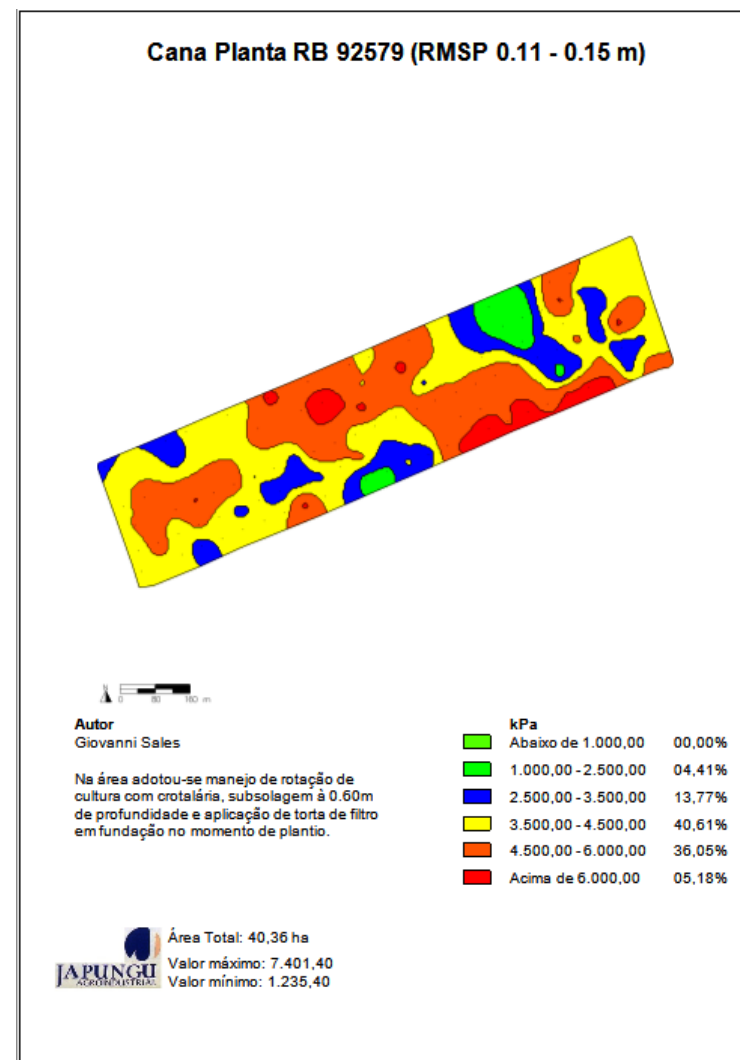


Figura 25 - Mapa de RMSP na profundidade 0.11 – 0.15 m.

6 . CONCLUSÃO

- A camada 0.16 – 0.20 m apresentou valor médio de 5264.99 kPa para resistência mecânica do solo à penetração configurando compactação nesta camada;
- Há dependência espacial o atributo resistência mecânica do solo à penetração e para as frações texturais areia, silte e argila na profundidade estudada, caracterizando variabilidade;
- O atributo silte apresentou maior alcance (A_0) com 94.00 m com índice de dependência espacial (IDE) forte;
- O atributo resistência mecânica do solo à penetração na profundidade 0.16 – 0.20 m apresentou maior alcance (A_0) com 249.00 m e com índice de dependência espacial (IDE) moderado;
- A grade amostral avaliada mostrou-se adequada para a representação da variabilidade espacial dos atributos em estudo, se ajuntando ao modelo Gaussiano.

7. BIBLIOGRAFIA

- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P. Comparação de penetrômetros na avaliação da compactação de Latossolos. *Engenharia Agrícola*, v.27, p.146-151, 2007.
- BOUYOUCUS, G.J.A. Recalibration of the hydrometer method for making analysis of soils. ***Agronomy Journal***, Madison, v.43, p.434-437, 1951.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do estado da Paraíba**. Rio de Janeiro: MA/SUDENE, 1972. 669 p. (Boletim Técnico, 15).
- CARTER, L. M. Portable recording penetrometer measures soil strength profiles. *Agricultural Engineering*, v.48, p.348-349, 1967
- CÂMARA, G.; CARVALHO, M. S. Análise espacial de eventos. In: DRUCK, S. et al. *Análise espacial de dados geográficos*. Planaltina, DF: EMBRAPA Cerrados, 2004. p. 55-76.
- CAMARGO, E. C. G. **Desenvolvimento, implementação e teste de procedimentos geoestatísticos (krigagem) no Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas (SPRING)**. 1997. 124 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1997.
- CAMARGO, W. P.; SOUZA, A. B. M.; NAGUMO, G. K.; MOLIN, J. P. Análise da produtividade espacial de mapas de produtividade. In: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão, Piracicaba, Esalq/USP, 2004. A
- CAMARGO, E. C. G. et al. Análise espacial de superfícies. In: DRUCK, S. et al. *Análise espacial de dados geográficos*. Planaltina, DF: EMBRAPA Cerrados, 2004. p. 79-122. B
- CAMBARDELLA, C. A. et al. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v.58, p.1501-1511, 1994.
- CARVALHO, M.P.; TAKEDA E.Y. & FREDDI, O.S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). *R. Bras. Ci. Solo*, 27:695-703, 2003.

CARVALHO, L.A.; NETO, V.J.M.,;SILVA, L.F.; PEREIRA, J.G.; NUNES WAGA & CHAVES, C.H.C.; Resistência mecânica do solo à penetração (RMP) sob cultivo de cana-de-açúcar, no município de Rio Brilhante- MS. *Revista Agrarian*, 1:07-22, 2008.

CASTRO. F. da S. **Zoneamento agroclimático para a cultura do *Pinus* no Estado do Espírito Santo**. 2008. 101 p. Dissertação (Pós-graduação em Produção Vegetal). Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2008.

CAVALCANTE, E. G. S.; ALVES, M. C.; SOUZA, Z. M. de; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1329-1339, 2007.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. Diagnóstico do município de Santa Rita, estado da Paraíba / Organizado [por] João de Castro Mascarenhas, Breno Augusto Beltrão, Luiz Carlos de Souza Junior, Franklin de Moraes, Vanildo Almeida Mendes, Jorge Luiz Fortunato de Miranda. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005. 10 p. + anexos.

DIAS JUNIOR, M.S.; MIRANDA, E.E.V. Comportamento da curva de compactação de cinco solos da região de lavras (MG). *Ciência Agrotécnica*, Lavras, v.24, n.2, p.337- 346, 2000.

DANIELS, J.; ROACH, B. T. Taxonomy and evolution. In: HEINZ, D. J. (Ed) **Sugarcane improvement through breeding**. Amsterdam: Elsevier, 1987. p. 7-84.

DAY, P.R. Particle fraction and particle size analysis. In: BLACK, C. A. (ed). *Methods of soil analysis*. Madison: **American Society of Agronomy**, 1965. part. 1, p.545-567 (Agronomy 9).

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.

ENCIDE, A. P. **Métodos não convencionais para avaliação da porosidade e da densidade do solo de um latossolo vermelho**. Dissertação de mestrado – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2005.

FOLONI, J. S. S.; LIMA, S. L. de; BULL, L. T. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, p.49-57, 2006.

- FORSYTHE, W.M. **Física de Suelos: manual de laboratório**. San José: Instituto Interamericano de Ciências Agrícolas. 1975. 212 p.
- FREITAS, V. A. de. **Análise de dados espaciais por meio de semivariogramas**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2000. 27 p.
- FUENTES, R. L.; RICHART, A.; TAVARES FILHO, J. ; GUIMARÃES, M. F.; FERREIRA, R. R. M. Evolução de propriedades físicas do solo em função dos diferentes sistemas de preparo em culturas anuais. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, v. 27, n. 2, p. 205-220, 2006.
- GONZAGA, B. A. B. Variabilidade espacial de atributos físicos em latossolo amarelo de área experimental – Monografia (Agronomia)- Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2012. 31f.: il.
- GREGO, C. R.; VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, n.29, p.169-177, 2005.
- GUEDES FILHO, OSVALDO.; VIEIRA, S. R.; CHIBA, M. K.; NAGUMO, C.; DECHEN, S. C. Saptial and temporal variability of crop yield and Rhodic Hapluodox properties underno-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34,p. 1-14, 2010.
- IBGE-INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA: **Sistema IBGE de recuperação automática. Banco de dados agregados. Brasília: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, 2012. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em: 29 abril 2013.
- IDO, O. T. et al. Crescimento e distribuição radicial de três variedades cultivares de cana-de-açúcar, em cana-soca, em dois tipos de solo, em Rizotron, i. uso do Winrhizo. **Scientia Agraria**. v. 7, n. 1-2, p. 21-26, 2006.
- JOHANN, JERRY A.; OPAZO, MIGUEL A. U.; SOUZA, EDUARDO G. DE AND ROCHA, JANSLE V. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e da produtividade em um Latossolo Bruno distrófico da região de Cascavel, PR. **Rev. bras. eng. agríc. ambient**. 2004, vol.8, n.2-3, pp. 212-219.
- JOURNEL, A. C.; HUIJBREGTS, C.J. Mining gestatistics. London: Academic, 1978. 600 p.

KRIGE, D.G. 1951. A statistical approach to some mine valuation and allied problems on the Witwatersrand. MS. Thesis. University of the Witwatersrand, Johannesburg, 1951.

LAMPARELLI, Rubens A. C.; ROCHA, Jansle V.; BORGHI, Elaine. **Geoprocessamento e agricultura de precisão: fundamentos e aplicações**. Guaíba: Livraria e Editora Agropecuária, 2001.

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

LEAL, R. M.; BARBOSA, J. C.; COSTA, M. G.; BELASQUE JUNIOR, J.; YAMAMOTO, P. T.; DRAGONE, J. Distribuição espacial de huanglongbing (greening) em citros utilizando a geoestatística. **Revista Brasileira Fruticultura**. Jaboticabal - SP, v. 32, n. 3, p. 808-818, Setembro 2010.

LIMA, C.L.R. *Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada*. 2004. 70p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” , Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

LIMA, F. V. *Análise espacial de atributos físicos do solo: processo de degradação em área de encosta*. - Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2013. 67f.: il.

MACEDO V.R.M; SILVA, A.J.N, & CABEDA, M.S.V. (2010) Influência de tensões compressivas na pressão de precompactação e no índice de compressão do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 14:856-862.

MACEDO, I. C. **Geração de qualidade de empregos**. 2007. Disponível em: <<http://www.portalunica.com.br>>. Acesso em: 07 julho. 2013.

MARCHÃO, R.L; BALBINO, L.C; SILVA, E.M; SANTOS, Jr. J.D.G; SÁ MAC, Vilela L & Becquer T (2007) Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob sistemas de integração lavoura-pecuária no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 42:873-882.

McBRATNEY, A.; WHELAN, B.; ANCEV, T. Future directions of Precision Agriculture. **Precision Agriculture**, n. 6, p. 7-23, 2005. <http://dx.doi.org/10.1007/s11119-005-06818>

- NÓBREGA, J.C.A., CUNHA, R.L., ALVARENGA, M.I.N., NÓBREGA, R.S.A. Avaliação de atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob cafeeiro em sistema convencional e orgânico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIRAS, 31, Guarapari, 2005. **Anais...** p.130.
- NOGUEIRA, F. M. de B.; BERNARDI, C. J.; COUTO, E. G. Aplicação da geoestatística para amostragens de solo em planície de inundação. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Alegre, de 3 a 8 de dezembro de 2000, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental - Região Rio Grande do Sul (ABES/RS), p.1-10, 2000.
- MOLIN, J. P.; MAGALHÃES, R. P. de; FAULIN, G. D. C. Análise espacial da ocorrência do índice de cone em área sob semeadura direta e sua relação com fatores do solo. *Engenharia Agrícola*, v.26, p.442-452, 2006.
- OHU, J.O; AYOTAMUNO, M.B.; FOLORUNSO, O.A. Compaction characteristics of prominent agricultural soil in Borno State of Nigeria. *American Society of Agricultural Engineering*, St. Joseph, v.30, p.1575-1577, 1987.
- OLIVEIRA, R. A. et al. Crescimento e desenvolvimento de três cultivares de cana-de-açúcar, em cana-planta, no Estado do Paraná. **Scientia Agraria**. v. 5, n. 1-2, p. 87-94, 2004.
- PASSOS E CARVALHO, M.; SORATTO, R. P.; FREDDI, O. S.; Variabilidade espacial de atributos físicos em um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico sob preparo convencional em Selvíria, Estado de Mato Grosso do Sul. *Acta Scientiarum Maringá*, v. 24, n. 5, p. 1353-1361, 2002.
- PIMENTEL-GOMEZ, F. & GARCIA, C.H. Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos. Piracicaba, FEALQ, 2002. 309p.
- RALISCH, R.; MIRANDA, T. M.; OKUMURA, R. S.; BARBOSA, G. M. C.; GUIMARÃES, M. F.; SCOPEL, E.; BALBINO L. C., Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho Amarelo do Cerrado sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.4, p. 381-384, 2008.
- RESENDE SILVA, A.; DIAS JUNIOR, M.S & LEITE, F.P (2011) Avaliação da intensidade de tráfego e carga de um forwarder sobre a compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Árvore**, 35:547-554.

- RIBON, A.A & TAVARES FILHO, J. (2008) Estimativa da resistência mecânica à penetração de um latossolo vermelho sob cultura perene no norte do estado do Paraná. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32:1817-1825.
- ROBOREDO, D., MAIA, J.C.S., OLIVEIRA, O.J. & ROQUE, C.G. (2010) Uso de dois penetrômetro na avaliação da resistência mecânica de um Latossolo vermelho distrófico. *Engenharia Agrícola*, 30:307-314
- SANTOS, M.L.; CARVALHO, M.P.; RAPASSI, R.M.A.; MURAISHI, C.T.; MALLER, A.; MATOS, F.A. Correlação linear e espacial entre produtividade de milho e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto do cerrado brasileiro. *Acta Sci. Agron.*, Maringá, n.28, p.313-321, 2006.
- SEVERIANO, E.C., OLIVEIRA, G.C., DIAS JUNIOR, M.S., CASTRO, M.B., OLIVEIRA, L.F.C. & COSTA KAP (2010) Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: II - quantificação das restrições às funções edáficas do solo em decorrência da compactação prejudicial. *Engenharia Agrícola*, 30:414-423.
- SCHÄFFER, B.; ATTINGER, W.; SCHULIN, R. Compaction of restored soil by heavy agricultural machinery: Soil physical and mechanical aspects. *Soil & Tillage Research*, v.93, p.28-43, 2007.
- SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.34, n.2, p.399-406, 2004
- SIMÕES, W.L.; SILVA, E.L.; LIMA, D.M.; OLIVEIRA, M.S. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico, submetido a diferentes manejos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, n.30, p.1061-1068, 2006.
- SIQUEIRA, G. M.; VIEIRA, S. R.; CEDDIA, M. B. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos. *Bragantia*, Campinas, v. 67, p.693-699, 2008.
- SUZUKI, L.E.A.S; REICHERT, J.M; REINERT, D,J & LIMA, C.L.R; (2007) Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 42:1159-1167
- TABOADA, M. A.; ALVAREZ, C. R. Abundância de raízes de milho (*Zea mays* L.) em solos de Argentina sob preparo convencional e plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.769-779, 2008.

- TING, K.C. 2008. Systems Approach to Precision Agriculture – Challenges and Opportunities. Disponível em: [http:// www.docstoc.com/docs/21081830/Systems-Approach](http://www.docstoc.com/docs/21081830/Systems-Approach) to- Precision-Agriculture---Challenges-and
- TRANGMAR, B. B. et al. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy*, San Diego, v.38, p.45-94, 1985.
- TORRES, E.; SARAIVA, O.F. **Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1999. 58p. (Circular Técnica, 23).
- VARGAS, M. (Autor). Os solos do ponto de vista da engenharia. In: *Introdução à mecânica dos solos*. São Paulo: Ed. Mc Graw-Hill, 1981. p.3-46.
- VIEIRA, S. R.; LOMBARDI NETO, F. Variabilidade espacial de potencial de erosão das chuvas do Estado de São Paulo. *Bragantia*, v.54, n.2, p.405-412, 1995.
- VIEIRA, S. R.; DECHEN, S. C. F.; SIQUEIRA, G. M.; DUFRANC, G. Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos relacionados com o estado de agregação de dois Latossolos cultivados no sistema de semeadura direta. *Bragantia*, v. 70, p.185- 195, 2011.
- 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. cap.13, p.319-344.
- ZIMBACK, C. R. L. **Geoestatística**. Botucatu: FCA/UNESP, 2003. 25 p.