

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

DIEGO HENRIQUE SILVA DE SOUZA

**VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E DA
PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR NA ZONA DA MATA NORTE DE
PERNAMBUCO**

RECIFE – PE
FEVEREIRO/2017



DIEGO HENRIQUE SILVA DE SOUZA

**VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E DA
PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR NA ZONA DA MATA NORTE DE
PERNAMBUCO**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração: Engenharia de água e solo.

Orientador: Profº Drº. Ênio Farias de França e Silva

Co-orientador: Profº Drº. Luís Fernando de Souza Magno Campeche

RECIFE - PE

FEVEREIRO/2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

S729m Souza, Diego Henrique Silva de
Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e da
produtividade da cana-de-açúcar na zona da mata norte de
Pernambuco / Diego Henrique Silva de Souza. – 2017.
81 f. : il.

Orientador: Ênio Farias de França e Silva.
Coorientador: Luís Fernando de Souza Magno Campeche.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de
Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Entomologia
Agrícola, Recife, BR-PE, 2017.
Inclui referências.

1. Agricultura de precisão 2. Geoestatística 3. Dependência
espacial 4. Física do solo I. Silva, Ênio Farias de França e, orient.
II. Campeche, Luís Fernando de Souza Magno, coorient. III. Título

CDD 632.7

**VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E DA
PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR NA ZONA DA MATA NORTE DE
PERNAMBUCO**

DIEGO HENRIQUE SILVA DE SOUZA

Dissertação defendida e aprovada em 23 de Fevereiro de 2017 pela Banca Examinadora:

Orientador:

Ênio Farias de França e Silva, Prof. Dr

DEAGRI/UFRPE

Examinadores:

Abelardo Antônio de Assunção Montenegro, Prof. Dr

DEAGRI/UFRPE

Lúcia Raquel Queiroz Pereira da Luz

EMBRAPA

“Mantenha a fé na crença, se a ciência não curar
Pois se não tem remédio, então remediado está
Não é um perdedor
Quem sabe a dor de uma derrota enfrentar
E a quem Deus prometeu, jamais faltou
Na hora certa o bom Deus dará
Deus é maior!
Maior é Deus, quem tá com Ele nunca está só
O que seria do mundo sem Ele.”
(**Clareou – Xande de Pilares**)

“À Deus e à Nossa Senhora da Conceição Aparecida que foram minhas forças espirituais nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais, **Carlos e Aldenize**, por todo amor, apoio e incentivo em mim depositados.

À **Patricia** que em todos os momentos esteve ao meu lado, me compreendendo, sendo fundamental para a realização desse sonho. E, sobretudo, por seu imenso amor.

Ao meu irmão **Danilo**, por todo amor, carinho, incentivo, exemplo e amizade.”

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à **Deus e à Nossa Senhora Aparecida** pelo sentido da vida, por sempre conduzirem meus caminhos e permitirem que meus sonhos se realizem, sendo minha fortaleza.

À **Universidade Federal Rural de Pernambuco** pela oportunidade e estrutura disponibilizada para realização dos estudos.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, na pessoa dos seus Coordenadores Professores **Ênio Silva e Mario Rolim** pela oportunidade oferecida realização do mestrado.

Agradeço especialmente ao meu Orientador Professor **Ênio Silva** pela oportunidade, incentivo, confiança depositada, pelo exemplo a ser seguido e orientação durante o processo construtivo desta Dissertação.

A **FACEPE**, pela bolsa concedida durante o curso.

Aos meus pais, **Carlos e Aldenize**, maiores incentivadores e responsáveis pelos meus estudos, que sempre me apoiaram para que eu alcançasse os meus objetivos. Eles são os maiores exemplos de amor, carinho e dedicação, sem eles não teria conseguido realizar meu sonho.

À **Patricia**, que em todos os momentos dessa jornada me compreendeu com seu apoio incondicional, sendo companheira e amiga. E, principalmente, pelo seu amor, carinho e dedicação, que nos manteve sempre juntos.

Ao meu melhor amigo, meu irmão **Danilo**, que sempre representou na minha vida o gesto mais sincero de amor, carinho e respeito.

Aos meus amigos e irmãos de coração, **Cleison e Lucas**, com quem sempre pude contar, que sonharam comigo esse sonho de realizar o Mestrado, com muito companheirismo.

Às minhas primas e irmãs de coração, **Cassya e Cynthia**, pela parceria, pelo carinho e cumplicidade, sempre me incentivando, ajudando e me dando força.

Às minhas tias **Cida e Lena**, e à minha madrinha **Lindalva**, sempre na torcida pelo meu sucesso, rezando à Deus para que eu alcançasse esse objetivo.

Aos meus Tios, Tias, Primos, Primas e Amigos por toda amizade, carinho e incentivo.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola: **Elvira, Hernande, Abelardo, Thaís, Ênio, Edivan, João Audifax, Mário, Manassés e Hamilton**, por todos os ensinamentos.

Aos professores **Brivaldo e Glécio** pela contribuição intelectual, disponibilidade e atenção, diante das minhas dúvidas e questionamentos, durante a execução do trabalho de Dissertação.

Ao secretário **Manoel** por toda dedicação e amizade, sempre prestativo e empenhado em ajudar.

A essencial contribuição da amiga **Juciléia**, pela confiança depositada e disponibilidade em auxiliar, sendo fundamental nessa jornada. E, sobretudo, pela amizade construída.

Aos amigos da minha graduação em Engenharia Agrícola que sempre torceram pelo meu sucesso: **Raíssa, Oucilane, Nicolý, Bruno Albuquerque, Bruno Ricardo, Marcos, Victor, Déborah, Gabriella, Tatianne, D. Alessandra, Sofia.**

Aos meus amigos e colegas de pós-graduação pelos momentos de descontração, aprendizado e confraternização. Agradeço em especial aos amigos: **Francisco, Eulâmpio, Renato, Péricles, Keila, Raquele, Fábio, Iug, Carol Fragoso, Liliane.**

Aos amigos da minha turma de mestrado em Engenharia Agrícola: **Jozé Neto, José Eduardo, Diorgénes, Douglas, Pedro Henrique, Keila, Liliane, Carol Fragoso, Jhon Lennon, Evanilson, Gébson, Aline, Danilo, Anna Hozana.**

À **turma da graduação** em que tive a oportunidade de exercer a docência, experiência de grande importância para meu aprendizado.

E a todos que de alguma forma fizeram parte dessa etapa relevante em minha vida!

OBRIGADO!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xii
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
OBJETIVOS	xv
Geral	xv
Específicos	xv
1. INTODUÇÃO.....	16
2. REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1. A cultura da cana-de-açúcar	18
2.1.1. Produção e feitos no desenvolvimento da cultura	18
2.1.2. Cultivar RB86 7515	20
2.2. Espodossolos	21
2.3. Atributos físicos do solo	22
2.2.1. Textura e frações granulométricas do solo	22
2.2.2. Densidade do solo	23
2.2.3. Porosidade do solo	24
2.2.4. Disponibilidade de água do solo	26
2.3. Geoestatística	28
2.4. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo	31
3. MATERIAL E MÉTODOS	34
3.1. Descrição da área experimental	34
3.2. Amostragens	37
3.3. Caracterização física do solo	38
3.4. Variáveis analisadas	39
3.4.1. Análise granulométrica	39
3.4.2. Determinação da densidade do solo	39
3.4.3. Determinação da umidade na capacidade de campo	40
3.4.4. Determinação da porosidade do solo e da distribuição de tamanho de poros	40
3.4.5. Produtividade da cana-de-açúcar	42

3.5. Estatística descritiva	43
3.6. Análise geoestatística	44
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5. CONCLUSÕES	68
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Semivariograma experimental	27
Figura 2. Modelos de semivariogramas com patamar	28
Figura 3. Mapa do Brasil com a localização do Estado de Pernambuco, destacando o Município de Goiana – PE, e a área experimental do estudo	32
Figura 4. Precipitação do Município de Goiana – PE nos anos de 2013 (A) e 2014 (B)	32
Figura 5. Mapa topográfico da área experimental do estudo	34
Figura 6. Localização dos pontos de amostragem na área de estudo	35
Figura 7. Amostras indeformadas de solo saturadas para determinação da porosidade total	37
Figura 8. Mesa de tensão para determinação da microporosidade do solo	38
Figura 9. Medição da produtividade da cana-de-açúcar na área de estudo: A. Formação dos feixes da cana-de-açúcar; B. Pesagem dos feixes da cana-de-açúcar contendo 10 colmos	40
Figura 10. Curvas de retenção de água no solo das camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m ajustadas através do modelo de van Genuchten	43
Figura 11. Semivariogramas ajustados para a densidade do solo (A) (0,00-0,20 m), e (B) (0,20-0,40 m), porosidade total (C) (0,00-0,20 m), e (D) (0,20-0,40 m), e microporosidade (E) (0,00-0,20 m), e (F) (0,20-0,40 m)	53
Figura 12. Semivariogramas ajustados para a macroporosidade (A) (0,00-0,20 m), e (B) (0,20-0,40 m), e umidade volumétrica (C) (0,00-0,20 m), e (D) (0,20-0,40 m)	55
Figura 13. Semivariogramas ajustados para os atributos granulométricos do solo: areia total (A) (0,00-0,20 m), e (B) (0,20-0,40 m), areia fina (C) (0,00-0,20 m), e (D) (0,20-0,40 m), e areia grossa (E) (0,00-0,20 m), e (F) (0,20-0,40 m)	56
Figura 14. Semivariogramas ajustados para os atributos granulométricos do solo: argila (A) (0,00-0,20 m), e (B) (0,20-0,40 m), e silte (C) (0,00-0,20 m), e (D) (0,20-0,40 m), e para a produtividade da cana-de-açúcar (E)	57

Figura 15. Mapas de isolinhas para a densidade do solo (A) (0,00-0,20 m), e (B) (0,20-0,40 m), porosidade total (C) (0,00-0,20 m), e (D) (0,20-0,40 m), microporosidade (E) (0,00-0,20 m), e (F) (0,20-0,40 m), e macroporosidade (G) (0,00-0,20 m), e (H) (0,20-0,40 m)	59
Figura 16. Mapas de isolinhas para a umidade volumétrica (A) (0,00-0,20 m), e (B) (0,20-0,40 m), e produtividade da cana-de-açúcar (C)	60
Figura 17. Mapas de isolinhas para a areia total (A) (0,00-0,20 m), e (B) (0,20-0,40 m), areia fina (C) (0,00-0,20 m), e (D) (0,20-0,40 m), e areia grossa (E) (0,00-0,20 m), e (F) (0,20-0,40 m)	61
Figura 18. Mapas de isolinhas para a argila (A) (0,00-0,20 m), e (B) (0,20-0,40 m), e silte (C) (0,00-0,20 m), e (D) (0,20-0,40 m)	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Atributos químicos [Potencial hidrogeniônico (pH); soma de bases (SB); acidez potencial ($H + Al^{3+}$); acidez trocável (Al^{3+}); capacidade de troca catiônica (CTC); porcentagem de saturação por Al^{3+} (m); matéria orgânica (MO); fósforo (P)] da área de estudo	33
Tabela 2. Valores médios dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980)	45
Tabela 3. Parâmetros estatísticos dos dados de produtividade da cana-de-açúcar ($t \cdot ha^{-1}$) e dos atributos físicos do solo	46
Tabela 4. Parâmetros de ajuste dos semivariogramas para a produtividade e os atributos físicos do solo	51
Tabela 5. Relação entre variância, coeficiente de variação (CV) e efeito pepita (C_0) para os atributos que apresentaram dependência espacial	54
Tabela 6. Matriz de correlação linear entre os atributos físicos do solo e a produtividade da cana-de-açúcar	64

RESUMO

As práticas agrícolas promovem alterações nas propriedades físicas do solo, ocasionando modificações de sua densidade, afetando a porosidade total, a distribuição do diâmetro dos poros e a disponibilidade de água às plantas. Estas alterações causam diretamente prejuízos ao desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, afetando a respiração das raízes, pela diminuição dos espaços porosos do solo, além de diminuir a capacidade de infiltração da água no solo. Portanto, a utilização de técnicas de manejo do solo e da água favorece a manutenção da produtividade agrícola, por meio da agricultura de precisão. O objetivo deste trabalho foi analisar a influência da variabilidade espacial dos atributos físicos de um Espodossolo Humilúvico órtico na produtividade da cana-de-açúcar, variedade RB86 7515, em uma área experimental, no Município de Goiana, na região da Zona da Mata Norte de Pernambuco. As amostragens do solo e da produtividade da cultura foram realizadas em 90 pontos escolhidos aleatoriamente na área experimental. Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas nas camadas de solo de 0,00-0,20 e 0,20 – 0,40 m, com a finalidade de analisar os atributos: textura, densidade do solo, umidade na capacidade de campo, porosidade total, macro e microporosidade, conforme a metodologia preconizada pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Para determinação da porosidade total, macro e microporosidade foi utilizada a mesa de tensão, e para determinação da umidade na capacidade de campo foi utilizada a câmara de Richards. A produtividade foi estimada por meio do peso médio da cana-de-açúcar em cada ponto amostral. Os dados foram avaliados adotando-se métodos de estatística descritiva, geoestatística e correlação linear simples. Verificou-se através dos semivariogramas que o modelo esférico foi o que melhor se ajustou ao conjunto de dados da maioria dos atributos avaliados. A produtividade da cana-de-açúcar na área de estudo foi superior à média nacional da safra 2013/2014. Não foi possível detectar dependência espacial para as frações texturais do solo, com exceção da fração argila na camada de 0,20-0,40 m que teve seus dados ajustados ao modelo exponencial. Através dos mapas de isolinhas, observou-se que a densidade do solo e a porosidade total, na camada de 0,00-0,20 m, apresentaram comportamento espacial inverso, e que a faixa mais estreita da área de estudo e com maior cota topográfica apresentou maiores valores de macroporos e menores valores de umidade e produtividade da cana-de-açúcar. A produtividade da cana-de-açúcar não apresentou correlação linear significativa com os atributos físicos do solo.

Palavras-chave: agricultura de precisão; geoestatística; dependência espacial; física do solo.

ABSTRACT

The agricultural practices promote changes in the physical properties of the soil, causing alterations in the density, affecting the total porosity, the pore diameter distribution, and the availability of water to the plants. These changes directly affect the development of sugarcane cultivation, affecting the respiration of the roots, the reduction of the porous spaces of the soil, and decrease the water infiltration capacity in the soil. Therefore, the use of soil and water management techniques favors the maintenance of agricultural productivity through precision agriculture. The objective of this work was to analyze the influence of the spatial variability of the physical attributes of in an orthodox Humiluvic Spodosol on sugarcane productivity, variety RB86 7515, in an experimental area, in the Municipality of Goiana, in the region of Zona da Mata North of Pernambuco. Soil samplings and crop productivity were performed at 90 randomly chosen points in the experimental area. Deformed and undisturbed samples were collected in the soil layers of 0.00-0.20 and 0.20 - 0.40 m, in order to analyze the attributes: texture, soil density, field capacity humidity, total porosity, macroporosity and microporosity, according to the methodology recommended by the “Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa”. For the determination of the total porosity, macroporosity and microporosity, the tensile table was used, and the Richards chamber was used to determine the moisture in the field capacity. Productivity was estimated by the average weight of sugarcane at each sampling point. The data were evaluated using descriptive statistics, geostatistics and simple linear correlation. Sugarcane productivity in the study area was higher than the national average for the 2013/2014 harvest. It was verified through semivariograms that the spherical model was the best fit to the dataset of most of the assessed attributes. It was not possible to detect spatial dependence for the textural fractions of the soil, except for the clay fraction in the 0.20-0.40 m layer that had its data adjusted to the exponential model. Through the isoline maps, it was observed that soil density and total porosity, in the 0.00-0.20 m layer, presented inverse spatial correlation. And that the narrowest area of the study area and with the highest topographic quota had higher values of macropores and lower values of moisture and productivity of the sugarcane. Sugarcane yield did not show a significant linear correlation with soil physical attributes.

Keywords: precision agriculture; geostatistics; spatial dependence; soil physics.

OBJETIVOS

Geral

Analisar a influência da variabilidade espacial dos atributos físicos de um Espodosolo Humilúvico órtico na produtividade da cultura da cana-de-açúcar, variedade RB86 7515, em uma área experimental na Região da Zona da Mata-Norte do Estado de Pernambuco, Brasil.

Específicos

- Avaliar a variabilidade espacial das frações granulométricas e da densidade do solo.
- Avaliar a variabilidade espacial da umidade na capacidade de campo do solo.
- Avaliar a variabilidade espacial da porosidade total, macroporosidade e microporosidade do solo.
- Avaliar a variabilidade espacial da produtividade da cana-de-açúcar, variedade RB86 7515.
- Avaliar a correlação espacial dos parâmetros físicos do solo com a produtividade da cana-de-açúcar.

1. INTRODUÇÃO

Inserida no Brasil em 1532, a cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) tem grande importância no cenário econômico, social e ambiental do país (Conab, 2015a), sendo responsável por uma parte expressiva do produto interno bruto, possibilitando seu uso como fonte de energia renovável, além de ser uma atividade de criação intensa de empregos.

Na safra 2015/2016 a produção de cana-de-açúcar no Brasil foi de 654,6 milhões de toneladas em pouco mais de 9 milhões de hectare. O Estado de Pernambuco, nesta safra, teve uma representatividade de 3% (276,3 mil hectares) de área cultivada com cana-de-açúcar, com uma produtividade média de 55.228 kg ha⁻¹ e uma produção de aproximadamente 15.260 mil toneladas, (CONAB, 2015b).

No Estado de Pernambuco, os solos agricultáveis com cana-de-açúcar estão localizados na zona litorânea. As ações antrópicas nestes solos, por meio das práticas agrícolas, na medida em que ocorrem operações no seu uso, ocasionam modificações nos atributos biológicos, químicos e, principalmente, físicos, como o aumento da densidade e a diminuição da porosidade total, alterando, conseqüentemente a distribuição dos diâmetros dos poros, refletindo na dinâmica da água na superfície e em todo perfil do solo.

As alterações nos atributos físicos do solo prejudicam o crescimento e o desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, visto que estas alterações provocam desestruturação do solo, diminuindo seus espaços porosos e aeração, afetando assim a respiração das raízes, além, de muitas vezes, devido à compactação, proporcionar o encharcamento do solo, diminuindo sua capacidade de drenagem (OLIVEIRA et al., 2013).

O conhecimento da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo permite seu manejo adequado. A partir do comportamento espacial destes atributos, é possível adotar práticas de manejo eficientes, otimizando a produtividade agrícola, além de minimizar impactos negativos ao meio ambiente (ALVES et al., 2013; SILVA et al., 2013).

A agricultura de precisão atua como um sistema que aperfeiçoa as práticas que devem ser adotadas no meio agrícola, coletando informações sobre a produtividade e as condições do solo. Apresenta, como resultados, mapas que permitem a maximização do uso do solo por meio da delimitação de zonas de manejo específico.

A geostatística contribui para a agricultura de precisão com parâmetros de análise como a “dependência espacial” dos dados, fornecendo um pouco mais de segurança no tamanho da malha de coleta de amostras e no número de dados necessários (ZONTA et al., 2014).

Em um estudo sobre a distribuição espacial da condutividade elétrica de um Espodosolo Humilúvico órtico e da produtividade da cana-de-açúcar em uma malha irregular, Siqueira et al. (2015a) detectaram dependência espacial para a condutividade elétrica e para a produtividade da cultura, demonstrando que o esquema de amostragem foi suficiente para detectar a distribuição espacial.

A geoestatística atua como uma ferramenta que permite a interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade natural dos atributos do solo e da planta, sendo importante em estudos de física do solo, pois se baseia em uma função aleatória contínua estacionária, contribuindo assim para diminuição dos custos sobre a produção, otimização na utilização de insumos agrícolas, proporcionando o aumento da produtividade.

Por meio da modelagem geoespacial é possível descrever quantitativamente a variabilidade espacial dos atributos do solo e da planta, caracterizar o comportamento destes atributos e correlacioná-los, buscando identificar a influência dos atributos físicos do solo na produtividade da cultura. A atuação da geoestatística serviu como base relevante para o desenvolvimento deste estudo, visto que propriedades físicas do solo, relacionadas à distribuição do espaço poroso e à disponibilidade de água apresentam estreita relação, refletindo diretamente no crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura da cana-de-açúcar

2.1.1 Produção e efeitos no desenvolvimento da cultura

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, seguido por Índia e China, assim como também o país é o maior produtor de açúcar e etanol. Com aumento de 5% na produção no ano de 2015, o Brasil é responsável por mais de 50% do açúcar comercializado no mundo. A cana é cultivada em todas as regiões do país, sendo que pouco mais de 50% da produção está concentrada no Estado de São Paulo. (CONAB, 2015a).

A área de cultivo de cana-de-açúcar no Brasil é de cerca de 9 milhões de hectares, distribuídas em todos Estados produtores. O Estado de São Paulo ocupa o primeiro lugar em produção com 51,7% (4.687,6 mil hectares) da área plantada e gera elevada receita para o setor agrícola. No Nordeste, o Estado de Pernambuco ocupa a segunda posição com uma representatividade de 3% (276,3 mil hectares) (CONAB, 2015b).

Além de se destacar no setor econômico, a cultura de cana-de-açúcar tem um papel ambiental muito importante, sendo que o etanol, quando utilizado como biocombustível, diminui a emissão de gases causadores do efeito estufa, atuando como uma das melhores alternativas a serem utilizadas, tendo em vista que a sua queima como combustível reduz em 70% a emissão de CO₂ na atmosfera em relação à gasolina (MACEDO et al, 2008; CALDEIRA-PIRES et al, 2013; CONAB, 2015a).

De acordo com os dados da Conab (2015), o Estado de Pernambuco obteve uma produtividade média cerca de 20% menor que a média nacional na safra 2015/2016, mostrando que a produtividade da cana-de-açúcar pode ser influenciada pela integração de diversos fatores que atuam diretamente sobre a cultura, como as condições climáticas, a variedade da cultura, as práticas culturais e as condições do solo (GILBERT et al., 2006).

O solo como um dos componentes de um conjunto complexo de fatores de produção, destaca-se pelo seu importante papel de fornecer às plantas suporte físico, água e nutrientes. Portanto, é importante o conhecimento das características inerentes a cada solo (fatores edáficos), a fim de caracterizar o potencial de produção agrícola (MANHÃES et al., 2015).

Os Espodossolos apresentam baixa fertilidade natural, com baixos valores de soma e saturação por bases, podendo ocorrer altos teores de alumínio extraível. (EMBRAPA, 2013).

A falta de informações sobre os Espodossolos tem contribuído para degradação ambiental e baixas produtividades, sendo necessário o estudo detalhado de suas características,

a fim de contribuir com informações que auxiliem no manejo de áreas, principalmente, com produção de cana-de-açúcar, cultura de fundamental importância para a economia agrícola nordestina (CARVALHO et al., 2013).

As práticas de plantio associadas ao preparo adequado do solo são fatores indispensáveis à otimização e ao desenvolvimento da cana-de-açúcar (JADOSKI et al., 2010). Fatores ambientais (umidade do ar e do solo, temperatura e luminosidade), fitotécnicos (práticas agrícolas), genéticos e fisiológicos (idade, sanidade das gemas e variedade) podem influenciar a brotação e o perfilhamento da cana (SERAFIM et al., 2012; MANHÃES et al., 2015).

As frações granulométricas do solo, areia, silte e argila, contribuem na resistência da camada superficial ao rompimento pelos brotos primários da cana-de-açúcar. (MAGRO et al., 2011).

A coifa é a região de crescimento da raiz que vence a resistência das porções compactadas do solo, constituída por um conjunto de células em processo de divisão celular e crescimento de um tecido muito sensível às barreiras físicas. Assim, é importante um bom preparo do solo, permitindo a descompactação de camadas que prejudicam o crescimento radicular em camadas mais profundas, evitando-se um crescimento superficial das raízes (MAGRO et al., 2011; MONTANHA, 2011).

É relevante conhecer sobre o desenvolvimento das raízes devido às propriedades do solo em que se desenvolvem nas diferentes idades e crescimento da planta. Os fatores do solo que mais influenciam no crescimento das raízes são o teor de umidade, a aeração do solo e a disponibilidade dos nutrientes (MAGRO et al., 2011).

A alteração das condições físicas do solo afeta consideravelmente a cultura da cana-de-açúcar, tendo em vista que, em decorrência da colheita mecanizada, podem-se ter reduções superiores a 50% no volume de macroporos do solo. Neste sentido, o comprometimento da sustentabilidade desta atividade agrícola, pode estar atrelado à alteração estrutural do solo, pois os macroporos determinam a taxa de movimentação de água no solo (SEVERIANO et al., 2012; LIMA et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2013).

A brotação das gemas, a capacidade de perfilhamento e o desenvolvimento da cana-de-açúcar podem ser influenciados pelo baixo conteúdo de água no solo, assim como também o excesso causado pela irrigação e má drenagem. As principais características físicas do solo, como: densidade, aeração e condutividade hidráulica, assim como o tipo de solo, irão influenciar no conteúdo de água ideal para uma boa brotação da cana-de-açúcar (CASAGRANDE, VASCONCELOS, 2008; GAVA et al, 2011).

Um solo com temperatura ideal e úmido, resultando em uma boa aeração, assegura uma brotação rápida, já que solos mais porosos facilitam uma brotação melhor, podendo ser considerada segura para um cultivo satisfatório (MAGRO et al., 2011).

2.1.2 Cultivar de cana-de-açúcar: RB86 7515

Os vários cultivares da cana-de-açúcar são desenvolvidos em busca de melhores índices de produtividade e qualidade da cultura. Em uma área com produção de cana-de-açúcar, a escolha dos cultivares é feita de acordo com as necessidades da unidade produtora, com as características inerentes à cultura, associada com as características da região em que a lavoura será estabelecida (MACÊDO et al., 2012).

Levando em consideração os aspectos da cultura, o cultivar mais adequado é aquele que apresenta maior concentração de sacarose, visto que este açúcar representa a maior parte no fornecimento de energia, além de ser desejável um cultivar que tenha uniformidade de diâmetro de colmo, despalha fácil, porte ereto, e ausência de florescimento e de chocamento (MACÊDO et al., 2012).

O cultivar RB86 7515 caracteriza-se por apresentar alta produtividade para cana planta e cana soca, alto teor de sacarose, bom fechamento, alta velocidade de crescimento, hábito de crescimento ereto, alta densidade de colmo, eventual florescimento e chocamento, porte alto, de cor verde arroxeado que se acentua quando expostos, fácil despalha, além de ter baixa exigências ambientais, conforme descrito pelo Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-Açúcar - PMGCA (2008).

Em ambientes de alto potencial de produção, há possibilidades, devido à alta produtividade, de atraso de maturação e de tombamento. Como principais vantagens do cultivar RB86 7515, destaca-se tolerância à seca e boa brotação de soqueira, mesmo colhida crua (PMGCA, 2008).

O melhoramento genético deve levar em consideração todas as características da planta que tornem um genótipo mais produtivo, sendo importante melhor exploração na busca de cultivares que apresentem sistema radicular com maior eficiência na absorção de nutrientes e água, para o melhor desenvolvimento da cultura (COSTA, 2005).

2.2 Espodossolos

Os Espodossolos são solos constituídos por material mineral que apresentam horizonte B espódico (Bh, Bhs ou Bs) abaixo de quaisquer horizontes A ou E ou horizonte hístico com menos de 40 cm de espessura. Os horizontes espódicos são formados pelo acúmulo de compostos amorfos de alumínio e ferro iluviados associados a materiais orgânicos (EMBRAPA, 2006).

Os Espodossolos são muito pobres em fertilidade pela baixa reserva de nutrientes, e normalmente com saturação por bases baixa, podendo ocorrer altos teores de alumínio extraível, sendo que os baixos valores dos íons pode ser consequência das características do solo (EMBRAPA, 2013).

A translocação da matéria orgânica ligada a ferro e alumínio com posterior acúmulo no horizonte B é facilitada em solos de textura mais arenosa, como é o caso da maioria dos Espodossolos. A função exercida por ácidos orgânicos de baixa massa molecular, ácidos húmicos e fúlvicos, explicam a mobilização e imobilização da matéria orgânica juntamente com ferro e alumínio no horizonte B do Espodossolos (CORRÊA et al., 1999).

Estes ácidos estão relacionados a dissolução de minerais primários e secundários presentes no solo e à mobilização por complexação e formação de quelatos com íons assim liberados. A complexação orgânica como mecanismo de podzolização está fundamentada no fato de que cerca de 80% do alumínio solúvel no horizonte eluvial em solos podzolizados encontra-se ligado a compostos orgânicos. Estas evidências mostram a importância destes compostos na formação dos Espodossolos, sendo esta uma das teorias que explicam a formação destes solos (BUURMAN & JONGMANS, 2005).

O horizonte B espódico é caracterizado pelo acúmulo de compostos orgânicos iluviais associados a óxidos de alumínio e ferro, podendo apresentar diferentes graus de cimentação. Outra exigência da definição do horizonte B espódico é apresentar percentagem de alumínio mais metade da percentagem de ferro determinados por oxalatos de amônio com valor superior ou igual a 0,5, sendo este pelo menos o dobro em relação ao do horizonte A ou E (EMBRAPA, 2006).

A escassez de informações sobre os Espodossolos tem contribuído para degradação ambiental e baixas produtividades, sendo necessário o estudo detalhado de suas características, a fim de contribuir com informações que auxiliem no manejo de áreas, principalmente, com produção de cana-de-açúcar, cultura de fundamental importância para a economia agrícola nordestina (CARVALHO et al., 2013).

2.3 Atributos físicos do solo

2.3.1 Textura e frações granulométricas do solo

Conhecer a textura do solo é importante para sua classificação taxonômica, contribuindo para entender os processos pedogenéticos que atuam no terreno, considerando que as geoformas da paisagem afetam no movimento da água e dos atributos do solo (LEÃO et al., 2010).

A textura do solo é a proporção das frações granulométricas areia, silte e argila. Sendo uma das características mais estáveis, portanto, não estão sujeitas a mudanças temporais rápidas, interfere nas diversas propriedades do solo (BRADY & WEIL, 2013). A distribuição das frações granulométricas é relacionada aos índices topográficos do solo (LEÃO et al., 2010; LEÃO et al., 2011).

Considerado um dos atributos físicos mais importantes do solo, a proporção relativa de areia, silte e argila, afeta diretamente outros atributos, incluindo capacidade de retenção de água, teor de matéria orgânica e drenagem, sendo um componente importante para avaliar a qualidade e o manejo do solo, assim como a sustentabilidade das práticas agrícola (VILAS-BOAS et al., 2016).

A textura do solo, principalmente a fração argila, composta de argilominerais e óxidos, define em boa parte a distribuição do diâmetro dos poros do solo, determinando assim a área de contato entre as partículas sólidas e a água, sendo por isso responsável pela força de retenção, além de ser a fração mais ativa nos processos físicos e químicos que ocorrem no solo, devido sua grande área específica (KLEIN et al., 2010).

Importante na utilização agrícola dos solos, a textura influencia as diversas propriedades químicas, físicas e hidráulicas (retenção, disponibilidade e movimento de água no solo, capacidade de troca de cátions, dentre outras). Nos solos argilosos constituídos, principalmente por microporos, a velocidade de infiltração é menor e a retenção de água no solo é maior, enquanto, nos solos arenosos predominam os macroporos, que apresentam elevada infiltração e baixa retenção de água (RIBEIRO et al., 2012).

Trabalhos sobre a composição do solo podem esclarecer acerca das alterações ocorridas nos processos geomórficos, fator que influencia, de forma direta, na variabilidade espacial das frações granulométricas do solo (REICHERT et al., 2009).

Rigato et al. (2005) analisando a influência dos atributos físicos do solo sobre a produtividade agrícola, verificaram que os locais de textura mais arenosa apresentaram valores menores de porosidade total, enquanto que nos locais com textura argilosa, a porosidade total

foi maior. Eguchi et al. (2002) verificaram dependência espacial nos atributos texturais, com alcances menores que 50 m.

A avaliação da morfologia superficial do solo também contribui para a compreensão do comportamento dos seus atributos texturais, observada sua influência na migração de sedimentos e em sua capacidade de expressar os processos geológicos e de intemperismo. O monitoramento da variabilidade espacial pode revelar também, ambientes que exige distintos manejos em razão das características do solo no espaço, maximizando seu potencial de uso (SIQUEIRA et al., 2009; MION et al., 2012).

2.3.2 Densidade do solo

A densidade do solo é um atributo físico que é usado como medida da qualidade do solo devido suas relações intrínsecas com a porosidade, a umidade, e a condutividade hidráulica, sendo necessário seu monitoramento para garantir a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (COSTA et al., 2007; DAM et al., 2005; MARTINS et al., 2009).

Com a retirada da cobertura vegetal e o uso intensivo da mecanização nas operações de cultivo, ocorrem alterações na estrutura afetando diretamente a densidade do solo, e, por conseguinte as propriedades físico-hídricas como: retenção de água no solo, resistência do solo à penetração, porosidade de aeração e disponibilidade de água às plantas, podendo resultar na diminuição da capacidade produtiva do solo (ASSIS e LANÇAS, 2005).

A densidade do solo pode ser usada como índice do grau de compactação de um solo, tendo em vista que o solo é um material poroso, e, quando comprimido, a mesma massa pode ocupar um volume menor, afetando sua estrutura, o arranjo e o volume dos poros e as características de retenção de água (REICHARDT e TIMM, 2008).

A formação de camadas compactadas reduz a macroporosidade e a atividade biológica no perfil, aumentando a densidade do solo, o que proporciona maior resistência física à expansão radicular (JIMENEZ et al., 2008), além de limitar a permeabilidade e a disponibilidade de água e nutrientes (FREDDI et al., 2007).

Diversos fatores inerentes a cada local de amostragem dificulta a avaliação da densidade do solo, devido principalmente a variabilidade espacial (ANDRADE et al., 2005). A variabilidade espacial da densidade do solo é altamente afetada pelo manejo agrícola, pela profundidade de amostragem e pelo tipo de solo (PIRES et al., 2011).

A textura influencia diretamente a densidade do solo. Solos arenosos apresentam densidades que variam de 1,3 a 1,8 g.cm⁻³, em solos argilosos a densidade pode variar de 0,9 a 1,6 g.cm⁻³ e em solos orgânicos esta variação pode ir de 0,2 a 0,6 g.cm⁻³, solos siltosos têm

valores de densidade entre os dos solos argilosos e arenosos (REICHARDT & TIMM, 2004; LIBARDI, 2005). Esta variação advém da micro agregação estável das frações de argila, que acarretam uma porosidade intra-agregados, reduzindo a densidade do solo (KLEIN, 2005).

Densidades do solo muito altas podem comprometer a respiração das raízes e exercer resistência ao desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar. Quando ocorre o aumento da densidade do solo na camada superficial, tem-se o maior prejuízo no desenvolvimento do sistema radicular, visto que a cultura da cana-de-açúcar tem maior exploração nutricional na camada arável do solo. Quando as raízes da cultura se localizam na camada de menor porosidade do solo, o efeito da compactação é maior sobre seu desenvolvimento (LIMA et al., 2013).

2.3.3 Porosidade do solo

As partes, orgânica (resíduos vegetais e animais) e inorgânica (areia, silte e argila) constituem a matriz do solo, formando os sólidos do solo. A parte não ocupada pelos sólidos é denominada poros do solo, ou espaço poroso, formando assim um conjunto de diversas formas e tamanhos, interconectados. O espaço poroso é ocupado por quantidades variáveis de uma solução aquosa denominada água no solo e de uma solução gasosa denominada ar do solo, apresentando variação espacial devido a sua complexidade e dinamicidade no sistema (BRADY & WEIL, 2013).

A porosidade do solo representa o espaço onde circulam ar, água e nutrientes, sendo diretamente dependente da densidade do solo, e afetada pelo nível de compactação do solo, pois quanto maior a densidade, menor será o volume do espaço poroso (REICHARDT & TIMM, 2004).

O aumento excessivo da densidade do solo acarreta diminuição do volume total de poros, reduzindo assim a permeabilidade e infiltração de água, quebra dos agregados e aumento da resistência mecânica à penetração, ocasionando prejuízo à qualidade física do solo e dificultando o crescimento das raízes das plantas (SPERA et al., 2004). A distribuição do diâmetro dos poros no solo tem papel preponderante na determinação da qualidade física do solo (KLEIN, 2012).

O conhecimento da distribuição dos poros por seus tamanhos permite um melhor entendimento do comportamento do solo, visto que, de acordo com essa distribuição, pode haver restrição do fluxo de água no solo (RIBEIRO et al., 2007).

Existem poros de tamanhos variados, desde de macroporos visíveis a olho nu, até poros muito pequenos, representados por espaços entre partículas coloidais. Diante das inúmeras

classificações do diâmetro de poros, considerando a configuração e a geometria do espaço poroso (PREVEDELLO, 1996) classifica os poros em: macroporos ($>300\ \mu\text{m}$), mesoporos ($50-300\ \mu\text{m}$) e microporos ($<50\ \mu\text{m}$). Portanto, espera-se que um solo arenoso, que possui muitas partículas maiores que $0,05\text{mm}$, apresente grande macroporosidade e um solo argiloso, que possui muitas partículas menores que $0,002\text{mm}$, apresente grande microporosidade (RESENDE et al., 2002).

Os macroporos se formam entre os agregados e são responsáveis por favorecer a infiltração de água, permitindo a drenagem, e por influenciar na aeração da matriz do solo, permitindo as trocas gasosas (PREVEDELLO, 1996), além de acomodarem as raízes das plantas. Os mesoporos são responsáveis pela redistribuição da água no solo, quando se esvaziam os macroporos.

Podendo exercer influência na infiltração, perdas de solo e de água, e na drenagem, as propriedades de transmissão de água no solo pelos macroporos podem afetar conseqüentemente o desenvolvimento das culturas e a qualidade ambiental (ABREU et al., 2004).

Os microporos, geralmente, ficam no interior dos agregados, retêm água disponível para as plantas, atuando como poros capilares, além de fornecerem abrigo para as bactérias. Nestes poros não há movimento da água por gravidade, sendo esta retida a tensões cada vez maiores, à medida que diminui o diâmetro dos poros, chegando a ser, a partir de determinados valores, indisponível para as plantas (RESENDE et al., 2002; OLIVEIRA, 2005).

O manejo do solo influencia os volumes de macroporos, microporos, e conseqüentemente, de porosidade total, principalmente em decorrência da alteração ocorrida na densidade do solo (BERTOL et al., 2004).

Neste sentido, alguns estudos mostram a influência do manejo do solo no volume de seus poros. Camilotti et al., 2005 em um estudo com cana-de-açúcar, encontraram após a colheita da cana, realizada mecanicamente, com implementos que compactam o solo, um aumento da microporosidade e redução na macroporosidade do solo. Uma redução significativa da porosidade total e da macroporosidade, também foi encontrada em camadas compactadas de solos cultivados com cana-de-açúcar sob sistema tradicional de manejo (SOARES et al., 2005b).

Como fator limitante para o aumento da produtividade da cana-de-açúcar, a compactação do solo ocasiona alteração na porosidade do solo, e conseqüentemente altera a distribuição do espaço poroso, além de reduzir a quantidade de água disponível para a cultura. Com essa alteração na porosidade do solo, tem-se redução das trocas gasosas, encharcamento

do solo, por conseguinte ocorre diminuição da infiltração da água e alteração na absorção de nutrientes pela planta (LIMA et al., 2013).

2.3.4 Disponibilidade de água do solo

O solo funciona como um reservatório de água para as plantas, sendo afetado pelo manejo e práticas culturais que alteram a dinâmica e retenção de água nos seus poros (VIEIRA, 2006).

Dentre os diversos fatores que afetam a retenção da água no solo, a granulometria é o principal, pois determina a área de contato entre as partículas sólidas e a água, definindo em boa parte a distribuição do diâmetro dos poros (REICHARDT & TIMM, 2004). Para Mesquita & Moraes (2004), a retenção e o fluxo de água no solo dependem da porosidade, da estrutura, da pedoforma e da profundidade.

O processo da retenção de água ocorre em solos não saturados, em decorrência das forças de capilaridade e adsorção que operam em sua matriz. Apresentando maior relevância, a força de capilaridade está presente na condição de solo úmido (não-saturado) e depende do arranjo estrutural e da geometria. As forças de adsorção estão mais presentes à medida que o teor de água no solo diminui, isto é, à medida que o solo se torna mais seco (MESQUITA & MORAES, 2004; REICHARDT & TIMM, 2004; LIBARDI, 2012).

Na força capilar, a retenção de água se dá, principalmente nos microporos dos agregados, os quais estão sempre associados à interface ar-água, funcionando como “tubos” capilares. No caso das forças de adsorção, a retenção ocorre na superfície dos sólidos do solo como filmes presos a esta, e independe do arranjo estrutural do solo (LIBARDI, 2005).

Em solos arenosos, devido ao grande espaço entre as partículas granulométricas e o rápido escoamento de água de percolação, a capacidade de retenção de água é muito reduzida (BUCKMAN & BRADY, 1989), portanto, quanto mais arenoso o solo, menor sua capacidade de retenção de água. De acordo com Kiehl (1979), fica simples correlacionar a porosidade do solo com sua capacidade de retenção de água, visto que os solos arenosos possuem maior proporção de macroporos que de microporos, além de apresentarem menores teores de matéria orgânica.

O silte e a argila podem ser englobados em uma só discussão, por ser constituídos de partículas finas (KIEHL, 1979). Bruand & Tessier (2000), observaram que a propriedade de retenção de água da argila varia grandemente de um solo para outro devido a estrutura da argila. Esta variação depende do tipo da argila, do tamanho de partícula elementar e da capacidade de troca de cátion.

A curva de retenção de água do solo (CRAS) é uma ferramenta relevante para descrever o comportamento físico-hídrico e a mecânica dos solos não saturados, sendo fundamental para caracterização das propriedades hidráulicas do solo (CICHOTA & JONG VAN LIER, 2004).

Para determinação prática da curva de retenção de água do solo (CRAS), utiliza-se a câmara de pressão de Richards como uma das técnicas laboratoriais mais tradicionais. Entretanto, existem vários modelos empíricos que se propõem e são empregados para descrever o comportamento da curva de retenção a partir de um determinado número de pontos medidos. Estes modelos empíricos servem como ferramenta de ajuste das CRAS, visto que ainda não foram desenvolvidas expressões matemáticas teóricas que representem esta relação físico-hídrica adequadamente (KASTANEK & NIELSEN, 2001). O modelo proposto por Van Guentchen (1980) é, provavelmente, o mais utilizado para prever os parâmetros que descrevem a CRAS.

A água disponível no solo é considerada a que contida entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP), sendo indispensável para o manejo adequado da água e orientação de projetos de irrigação (REICHARDT & TIMM, 2004).

A capacidade de campo é a quantidade de água retida no solo após drenagem de 2 ou 3 dias, a partir da condição de completa saturação do solo (PREVEDELLO, 1996). O ponto de murcha permanente representa o teor de umidade no solo, em que, abaixo dele, a planta não conseguirá retirar água do mesmo na mesma intensidade em que ela transpira, não permitindo recuperar sua turgidez, ocasionando sua morte (HILLEL, 1980).

O manejo inadequado do solo proporciona aumento na densidade, conseqüente diminuição da capacidade de retenção e armazenamento de água e aumento na resistência do solo à penetração das raízes, comprometendo o desenvolvimento das culturas (MONTANARI et al., 2010). A disponibilidade de água do solo é um dos fatores ambientais que mais interferem na produção de cana-de-açúcar, pois determina o estabelecimento da cultura durante seu estado vegetativo (RAMESH, 2000).

Neste contexto, é relevante o conhecimento da variabilidade espacial da capacidade de retenção de água e de outros atributos correlacionados com a disponibilidade de água do solo, permitindo o manejo específico, a fim de proporcionar um melhor desenvolvimento da produção agrícola. Para isto, a geoestatística é utilizada como ferramenta que permite indicar alternativas de manejo adequado que proporcionem a minimização do efeito da variabilidade dos atributos físicos do solo sobre os cultivos, permitindo modelar e analisar a variabilidade espacial dos atributos de interesse agrícola, além de mapear a área de estudo (SOUZA et al., 2010).

2.4 Geoestatística

Os estudos da geoestatística iniciaram-se com os trabalhos pioneiros de H. J. de Wijs (DE WIJS, 1951, 1953), professor da Universidade Técnica de Delf, na Holanda, e Daniel G. Krige (KRIGE, 1951), engenheiro de minas que trabalhou nas minas de ouro do Rand, na África do Sul.

Os conceitos básicos da geoestatística surgiram quando Krige (1951), concluiu que a variância dos dados possuía uma estruturação que dependia da distância de amostragem, em seus estudos com dados de mineração (VIEIRA, 1995). Em 1955, Duval e L'vy publicaram os primeiros resultados descrevendo os estudos de Krige (LANDIM, 2006).

A geoestatística é voltada para determinar a dependência espacial das observações de uma variável, fornecendo um conjunto de técnicas necessárias para entender a aparente aleatoriedade dos dados, estabelecendo uma função de correlação espacial (GUIMARÃES, 2004; YAMAMOTO E LANDIM, 2013).

O estudo da geoestatística pode ser considerado como uma aplicação prática da Teoria das variáveis regionalizadas (ANDRIOTTI, 2003). Vieira et al., (1983), descreveu que uma função espacial numérica, que varia de um local para outro, com uma continuidade aparente, cuja variação não pode ser representada por uma função matemática simples, define o conceito de variável regionalizada.

A geoestatística se destaca como metodologia que oferece a incerteza associada à estimativa. Para análise de dependência espacial utilizando métodos geoestatísticos, um requisito básico na amostragem é que as observações (as amostras) sejam referenciadas. Não é necessário utilizar coordenadas geográficas, mas algum tipo de referência deve existir (GUIMARÃES, 2004).

Os conceitos teóricos da geoestatística são embasados em funções e variáveis aleatórias (VIEIRA, 2000), sendo que na prática é necessário relacionar o conjunto de dados em estudo com uma das hipóteses da geoestatística, seguindo esta restrição a fim de detectar variabilidade espacial (SIQUEIRA, 2006).

Segundo Costa (1999) e Vieira (2000), uma variável regionalizada é estacionária se seus momentos estatísticos forem os mesmos para qualquer posição no campo de amostragem, não variando com a translação.

Para uma função aleatória, uma das três hipóteses de estacionaridade deve ser satisfeita, possibilitando assim a utilização das técnicas geoestatísticas. Sendo elas: hipótese de estacionaridade de segunda ordem, hipótese de tendência ou krigagem universal e hipótese intrínseca.

A hipótese de estacionaridade de segunda ordem exige a existência de uma variância finita, sendo uma hipótese pouco utilizada, pelo fato de ser uma hipótese difícil de ser satisfeita (PREVEDELLO, 1987; COSTA, 1999; VIEIRA, 2000).

Na hipótese de tendência ou de krigagem universal, os conjuntos de pares apresentados crescem sem limites, para todos os valores de h calculados, não tendo covariância definida e não possuindo variância finita (VIEIRA, 2006).

De acordo com Trangmar et al. (1985), a hipótese de estacionaridade intrínseca é também conhecida como sendo de estacionaridade forte. No entanto, é necessário compreender inicialmente a estacionaridade de primeira ordem como sendo a hipótese de que o valor esperado da função $Z(x_i)$ é o mesmo para toda área, independentemente da distância de separação h , ou da posição que ocupa.

A hipótese intrínseca considera que a média dos valores $Z(x_i)$ e a variância dos incrementos $Z(x_i) - Z(x_{i+h})$, são função apenas do valor de h , e ocorrem independentemente da localização (ALMEIDA & RIBEIRO JUNIOR, 1996). Sendo uma hipótese que não exige a existência de variância finita.

A hipótese intrínseca é mais frequentemente usada na geoestatística, por ser menos restritiva, já que requer somente a existência do semivariograma com patamar (VIEIRA, 2000).

O semivariograma analisa o grau de dependência espacial entre amostras, além de definir parâmetros necessários para estimativa de valores não amostrados no espaço, por meio da técnica de krigagem (SALVIANO, 1996).

Embasada na pressuposição de estacionaridade da hipótese intrínseca (Vieira, 2000), a auto correlação espacial entre amostras vizinhas é calculada por meio da semivariância $\gamma(h)$ a qual é estimada pela Equação (1):

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

Em que: $N(h)$ é o número de pares experimentais de observações $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$ separados por uma distância h (JOURNAL e HUIBREGTS, 1978). Na geoestatística, $Z(x_i)$ é descrito como variável regionalizada (CLARK, 1979).

No semivariograma, se $\gamma(h)$ não depende da orientação e apenas depende da distância, o semivariograma é então denominado isotrópico (ALMEIDA & RIBEIRO JUNIOR, 1996; CAMARGO, 1997; CARVALHO, 1991). Entretanto, se o fenômeno estudado apresentar

estruturas de variabilidade espacial diferentes na direção (X ou Y) tem-se um caso de anisotropia (ORTIZ, 2003).

A dependência espacial é representada como uma correlação entre amostras que diminui à medida que a distância aumenta e não mais existe quando a distância entre os pontos amostrais é suficientemente grande (VIEIRA, 2000).

O ajuste do modelo matemático aos dados (no gráfico) define os parâmetros do semivariograma, que são: alcance (a), patamar ($C = C_0 + C_1$), efeito pepita (C_0), e contribuição ou variância estruturada (C_1), apresentados na Figura 1. Esses parâmetros são de grande importância para construção de mapas de contorno (ISAAKS E SRIVASTAVA, 1989).

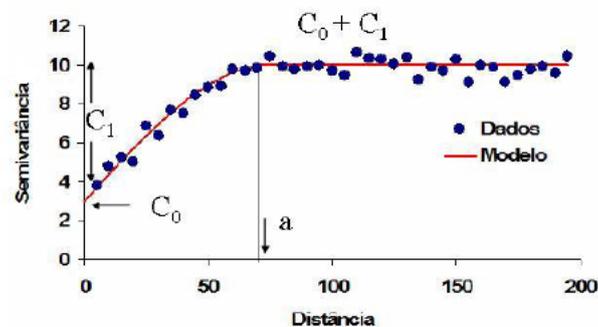


Figura 1. Semivariograma experimental.

- Alcance (a): representa a distância dentro da qual as amostras estão correlacionadas espacialmente, quando as distâncias são superiores ao valor do alcance, as amostras não apresentam dependência espacial (CRESSIE, 1993);
- Patamar ($C = C_0 + C_1$): é o valor do semivariograma correspondente ao seu alcance (a). É o valor no qual a função semivariância $\gamma(h)$ se estabiliza (ISAAKS E SRIVASTAVA, 1989);
- Efeito pepita (C_0): representa a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras.
- Contribuição ou variância estruturada (C_1): representa a diferença entre o patamar ($C = C_0 + C_1$) e o efeito pepita (C_0).

A escolha do semivariograma teórico para realização da interpolação utilizando a técnica geoestatística da krigagem é feita após a construção do semivariograma experimental e a determinação dos seus parâmetros.

Os modelos teóricos podem ser classificados em modelos sem patamar, representando os fenômenos que têm capacidade infinita de dispersão, baseados na hipótese de tendência ou krigagem universal, não tendo variância finita e a covariância não pode ser definida (VIEIRA, 2000); e modelos com patamar, em que a semivariância $\gamma(h)$, aumenta com o aumento da distância h entre as amostras, até estabilizar, atingindo o patamar, sendo ajustes que representam a hipótese de estacionaridade de segunda ordem (MACHADO, 1994).

De acordo com Vieira (2000), os modelos com patamar são mais utilizados no estudo de variáveis de interesse agrônomo, sendo eles: esférico, exponencial e gaussiano (Figura 2).

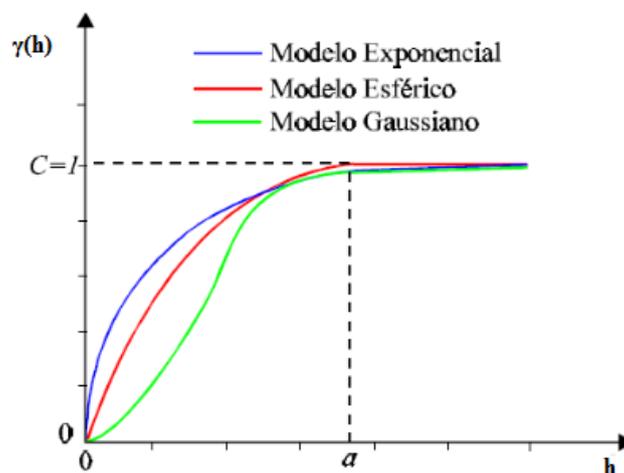


Figura 2. Modelos de semivariogramas com patamar.
Fonte: (ISAAKS SRIVASTAVA, 1989).

Um dos pesquisadores pioneiros no estudo da relação da variância versus a distância, Daniel G. Krige derivou a técnica geoestatística da krigagem. Esta técnica usa a dependência espacial entre amostras vizinhas, expressa no semivariograma para estimar valores em qualquer posição dentro do campo, com variância mínima e sem tendência (VIEIRA, 2000). Quando verificada a dependência espacial, por meio da análise do semivariograma, pode-se utilizar a krigagem como processo interpolador para estimar valores sendo representada por meio de mapas de superfícies e mapas de isolinhas.

A krigagem é importante, pois além de estimar os valores sem tendência para os locais não medidos, permite conhecer a confiança associada a estas estimativas (VIEIRA, 2000).

2.5 Variabilidade Espacial dos atributos físicos do solo

Presente desde a sua formação, a variabilidade espacial dos solos, continua mesmo depois que estes atingem seu estado de equilíbrio dinâmico (SOUZA, 2004). A distribuição do

solo na superfície terrestre não se dá de maneira uniforme, sendo esta situação responsável pela variação espacial e contínua de seus atributos (SIQUEIRA, et al., 2008).

Como resultado de processos pedogenéticos, a variabilidade espacial dos atributos dos solos pode ser demonstrada por resultados dos levantamentos e análises dos solos, bem como pelas diferenças encontradas nas produções das plantas (SILVA et al., 2010). O conhecimento da distribuição espacial dos atributos do solo é importante para determinação dos parâmetros responsáveis pelo rendimento das culturas, sendo de fundamental importância para alcançar uma agricultura sustentável (WEIRICH NETO et al., 2006).

No Brasil, cada vez mais, os agricultores vêm adotando o sistema de produção da agricultura de precisão, diante do cenário de variabilidade existente no meio agrícola (JOHANN, et al., 2004). Este sistema está embasado na coleta de informações sobre os atributos do solo, do terreno, da produtividade e das condições da cultura, correlacionando com a sua localização, representando estas por meio de mapas temáticos, sendo indispensável a caracterização da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo por meio de amostragem capaz de representar tais variações (BOTTEGA et al., 2013).

A adoção do sistema da agricultura de precisão se justifica porque, a maioria dos produtores agrícola considera uniforme o solo de cada área de cultivo, sendo que cada talhão pode ter consideráveis variações em seus atributos, tais como variabilidade espacial do tipo de solo, da necessidade de nutrientes, da produtividade e da declividade. Portanto, há necessidade de se conhecer os diversos fatores que influenciam a produtividade de uma cultura. Neste sentido, é importante o estudo da variabilidade espacial existente no solo, no intuito de otimizar análises laboratoriais e despesas com coleta de dados a campo (JOHANN et al., 2004).

O estudo da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo apresenta grande importância na escolha da área, na locação das unidades experimentais, nas interpretações de resultados, e na coleta de amostras. Portanto, quanto mais heterogêneo for o solo, maior deve ser o número de amostras coletadas a fim de atingir maior exatidão na avaliação de suas características (LEÃO et al., 2007).

Os atributos físicos do solo apresentam variabilidade espacial mesmo em uma área aparentemente homogênea, pois a formação do solo é resultante de uma série de fatores, em que o produto final é bastante heterogêneo em relação às suas características e propriedades. As variações espaciais do solo tem sido um assunto bastante abordado no estudo da geoestatística (CAJAZEIRA e ASSIS JÚNIOR, 2011).

Por meio da geoestatística, o estudo da variabilidade espacial, possibilita a interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade natural dos atributos avaliados, levando

em consideração a dependência espacial dentro do intervalo de amostragem (SOUZA et al., 2009), além de permitir indicar alternativas de uso, possibilitando melhor compreensão da variabilidade dos atributos e sua influência no ambiente (SILVA NETO et al., 2012).

Warrick & Nielsen (1980), destacaram que os atributos físicos do solo desempenham principal função dentre as propriedades do solo. Dependendo da intensidade de preparo do solo, o cultivo acarreta modificações em seus atributos físicos (SOUZA et al., 2004). De acordo com o manejo adotado e com o material de origem dos solos, os atributos físicos, variam de um local para outro, apresentando continuidade ou dependência espacial, assim como mostram alguns estudos mais específicos sobre estes atributos (SILVA et al., 2004; SOUZA et al., 2006; AMARO FILHO et al., 2007; CAMARGO et al., 2008; BOTEGA et al., 2011).

Os atributos físicos do solo variam entre pontos relativamente próximos em área de mesma unidade taxonômica, muitas vezes de forma significativa (MENDES et al., 2008). Estudos correlatos a este tema mostram que as propriedades físicas do solo quase sempre apresentam dependência espacial (CAMPOS et al., 2007a; CARVALHO et al., 2003; EGUCHI et al., 2002; LIMA et al., 2006).

A maioria dos estudos relacionados à variabilidade espacial dos atributos físicos do solo tem demonstrado ampla diversidade de resultados, com variação entre os locais estudados com ou sem continuidade espacial, provavelmente associada ao sistema de manejo e às características intrínsecas dos solos (GREGO & VIEIRA, 2005). Segundo Aquino et al. (2014), os atributos físicos do solo permitem o monitoramento de áreas que “sofrem” algum tipo de interferência, além de ser bons indicadores de qualidade.

A variabilidade espacial dos atributos envolvidos no processo de produção agrícola do solo em áreas extensas pode ser relativamente elevada (SOUZA et al., 2004). Sendo assim, é possível ter redução dos custos nos sistemas de produção a partir do conhecimento da variabilidade espacial dos seus atributos (SIQUEIRA et al., 2008).

Siqueira (2006), destaca que a análise da variabilidade espacial do solo por meio da geoestatística permite indicar alternativas de manejo que levem a minimização dos efeitos da variabilidade espacial dos atributos físicos na produção das culturas. Compartilhando da mesma ideia, Oliveira et al. (2013), ressaltaram que o estudo da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo permite o melhor controle dos fatores de produção das culturas e monitoramento ambiental.

No cultivo da cana-de-açúcar são necessárias diversas operações de preparo do solo com a utilização de implementos que contribuem para a degradação e a modificação da estrutura do solo para a efetuação do plantio (CARVALHO et al., 2012). Por isto, é fundamental para a

tomada de decisão mais adequada quanto ao preparo e manejo do solo, quantificar seus atributos físicos e analisar sua variabilidade espacial, visando a obtenção de maiores produtividades (SOUZA et al., 2010).

Podendo indicar alternativas de manejo, a análise da variabilidade do solo além de permitir reduzir os efeitos sobre a produção da cana-de-açúcar, aumenta a possibilidade de estimar respostas da cultura sob determinadas práticas de manejo adotadas (SOUZA et al., 2004).

A variabilidade espacial dos mais diversos atributos físicos é fator condicionante para distribuição da água no solo e consequente desenvolvimento das culturas. Portanto, a medida da umidade é necessária para a pesquisa e entendimento do comportamento de distribuição de água no solo (SIQUEIRA, 2006). O conhecimento sobre a condição da umidade do solo fornece informações relevantes no estudo de troca entre o solo e a atmosfera e, principalmente, na produção agrícola, por meio do efeito da disponibilidade de água para o rendimento das culturas (ROSSATO et al., 2005).

A avaliação da influência da variabilidade espacial dos atributos do solo na produção das culturas tem sido alvo de estudo de alguns autores (BRITO et al., 2006; ROCHA et al., 2005; JOHANN et al., 2004). Entretanto, é preciso compreender que a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo depende das características edafo-climáticas, visando otimização do solo, afim de garantir o desenvolvimento sustentável (SIQUEIRA, 2006).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição da Área Experimental

O experimento foi conduzido no Município de Goiana, em uma área da Usina Santa Teresa de aproximadamente 6,5 ha, localizada na região da Zona da Mata Norte de Pernambuco, situada sob as seguintes coordenadas geográficas: 07° 34' 25'' S e 34° 55' 39'' W, apresentando altitude média de 8,5 m (Figura 3).

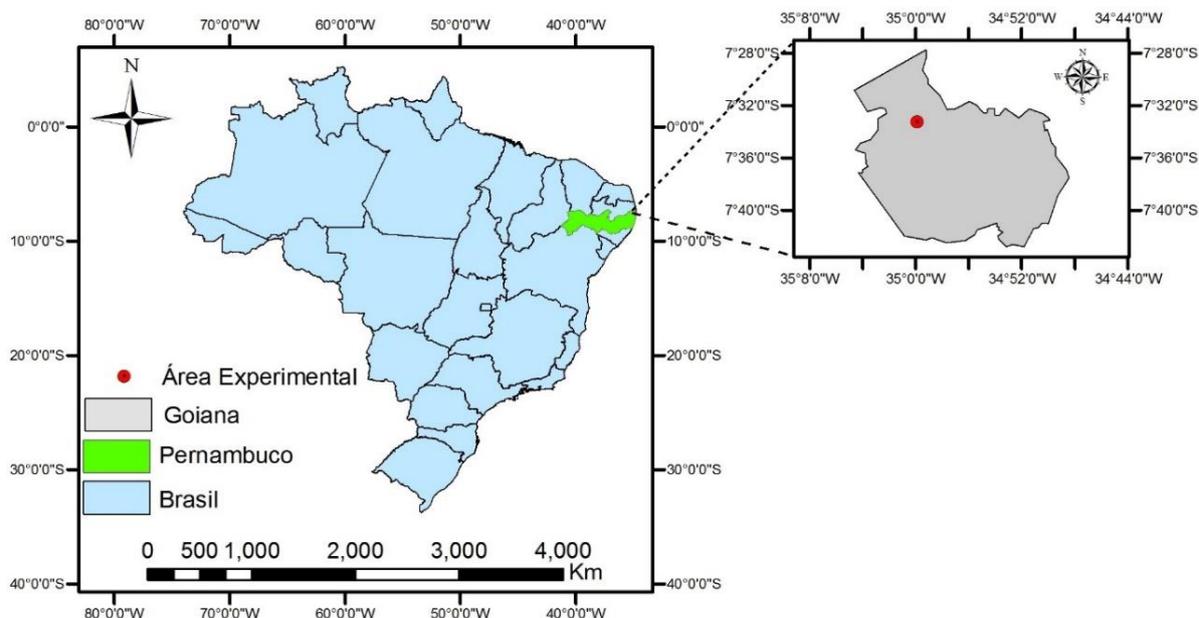


Figura 3. Mapa do Brasil com a localização do Estado de Pernambuco, destacando o Município de Goiana – PE, e a área experimental do estudo.

Segundo a Classificação Climática de Köppen, o clima da região, é tropical úmido do tipo As' ou pseudotropical, que se caracteriza por ser quente e úmido, com chuvas de outono a inverno de aproximadamente 2000 mm anuais, concentradas entre os meses de maio a julho (Figura 4), e com temperaturas médias anuais variando em torno de 24°C.

Derivados do grupo Barreiras, os solos dos lotes da Usina Santa Teresa se caracterizam por ser constituídos de sedimentos de origem continental do final do Terciário, de textura arenosa até argilosa (BRASIL, 1969, 1972). No Estado de Pernambuco, a formação Barreiras apresenta maior extensão ao norte do Estado (Zona da Mata Norte), sendo descontínua em direção ao sul, onde se encontram deposições pouco espessas deste grupamento, morfologicamente semelhantes, porém com grande variação quanto à granulometria dos sedimentos (CPRM, 2001).

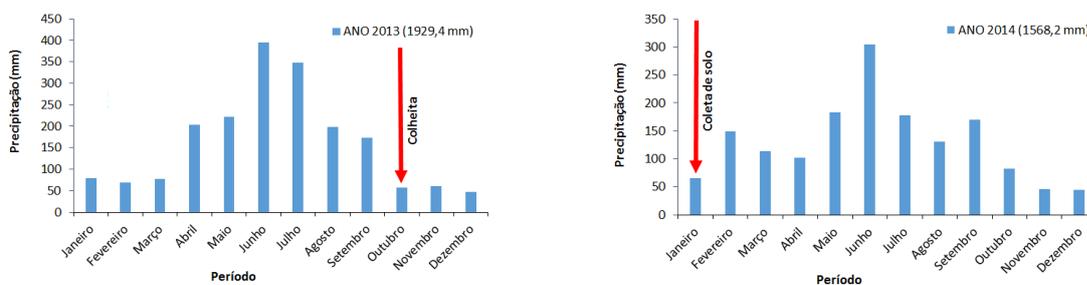


Figura 4. Precipitação do Município de Goiana – PE nos anos de 2013 (A) e 2014 (B).

De acordo com a Embrapa (2013), o solo da área de estudo se classifica como um Espodosolo Humilúvico órtico de textura arenosa. Os Espodosolos se caracterizam como solos ácidos e pobres em bases trocáveis. Fisicamente, apresentam em geral textura arenosa, com baixa capacidade de retenção de água e nutrientes, problemas de drenagem, com horizontes subsuperficiais endurecidos que impedem a percolação da água, formando lençol freático suspenso no período de chuva, podendo influenciar no crescimento das raízes quando ocorrem em baixa profundidade (CARVALHO et al., 2013).

Na caracterização química do solo da área de estudo, foram determinados valores baixos para a soma de bases (S), acidez potencial ($H + Al^{3+}$), acidez trocável (Al^{3+}), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por Al^{3+} (m), matéria orgânica (MO) fósforo (P) e o pH fortemente ácido (PEREIRA, 1998). Podendo-se inferir, com base nos dados da Tabela 1, que a área apresenta baixa fertilidade natural (RIBEIRO et al., 1999).

Tabela 1. Atributos químicos [Potencial hidrogeniônico (pH); soma de bases (SB); acidez potencial ($H + Al^{3+}$); acidez trocável (Al^{3+}); capacidade de troca catiônica (CTC); porcentagem de saturação por Al^{3+} (m); matéria orgânica (MO); fósforo (P)] da área de estudo.

Profundidade (m)	Horizonte	pH		SB	$H+Al^{3+}$	Al^{3+}	CTC	m	MO	P
		H ₂ O	KCl							
					cmol _c kg ⁻¹			%	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹
0,00 – 0,15	A	4,9	4,30	3,20	1,30	0,20	4,50	2,00	21,00	28,00
0,15 - 0,30	E	4,5	4,20	1,20	1,50	0,20	3,00	8,00	14,00	16,00
0,30 - 0,60	Bh	4,40	4,10	0,60	0,50	0,20	1,00	20,00	1,00	2,00
0,60 – 1,00	Bhm1	4,30	4,00	0,50	0,60	0,00	1,00	9,00	0,50	2,00
1,00 - 1,20	Bhm2	4,00	3,80	0,50	1,00	0,50	0,00	55,00	5,00	2,00
1,20 +	Bs	4,00	4,00	0,50	0,40	0,70	0,60	56,00	5,00	1,00

A área de estudo está localizada à aproximadamente 10 km do Oceano Atlântico na direção leste e a 2,5 km a nordeste do rio Goianinha (Figura 5). Nos últimos 27 anos, vem sendo manejada com a cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), cultivada em sequeiro, com queima da palha para colheita, sendo assim uma área de grande importância no contexto regional. O plantio desta cultura é feito com espaçamento entrelinhas de 1 m.

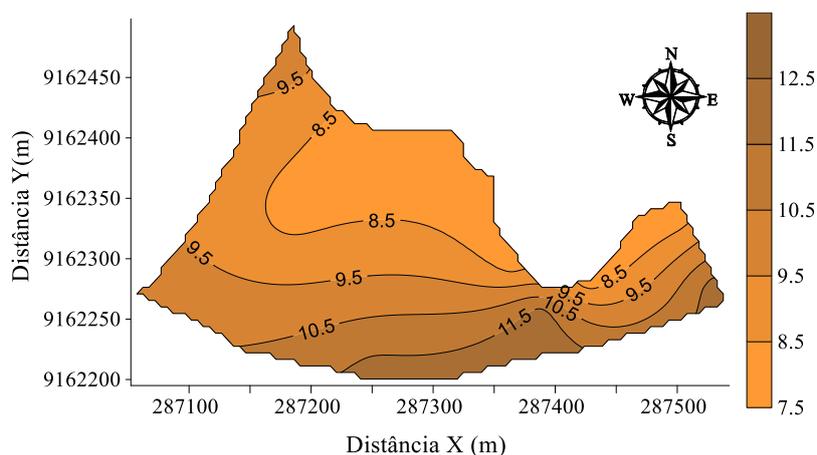


Figura 5. Mapa topográfico da área experimental do estudo.

Fonte: (SIQUEIRA et al., 2015).

Na safra 2010/2011, o cultivo foi renovado, sendo a área arada, gradeada e sulcada. Foi realizada calagem e adubação e, posteriormente, plantada cana-de-açúcar, variedade RB86 7515. Esta variedade, além de apresentar crescimento rápido com alta produtividade agrícola e alto teor de sacarose, possui ótima brotação das socas (PMGCA, 2008).

3.2 Amostragens

As amostragens do solo e da planta (biometria e colheita) foram realizadas em 90 pontos georreferenciados, escolhidos aleatoriamente na área experimental (Figura 6). Nestes pontos, foram coletadas amostras deformadas e indeformadas de solo nas camadas de 0,00-0,20 e de 0,20-0,40 m, e amostras de cana-de-açúcar. Para coleta das amostras indeformadas de solo utilizou-se um amostrador tipo Uhland com cilindro volumétrico de inox, de diâmetro e altura de 5 cm, e volume de aproximadamente 98 cm³.

A amostragem da cana-de-açúcar foi realizada em outubro de 2013 e a amostragem de material de solo em janeiro de 2014. Com as amostras deformadas foi realizada a análise granulométrica do solo para determinação da textura, e com as amostras de solo indeformadas foram determinados os seguintes atributos: densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade e umidade na capacidade de campo.

Após a realização das amostragens, foram determinados os valores dos atributos analisados para cada um dos pontos de coleta de dados, e gerados mapas de isolinhas para todos os atributos.

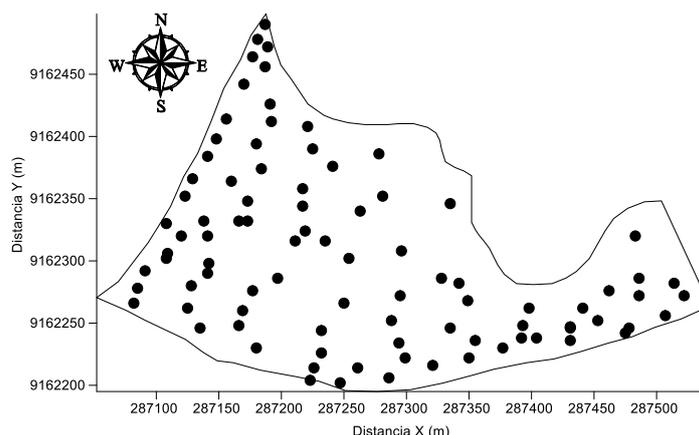


Figura 6. Localização dos pontos de amostragem na área de estudo.

Fonte: (SIQUEIRA et al., 2015).

3.3 Caracterização física do solo

Para caracterização do solo da área foi construída a curva característica de retenção de água no solo para cada camada, conforme metodologia proposta pela Embrapa (2011). Para isto, foram escolhidas aleatoriamente cinco amostras indeformadas de solo por camada, coletadas em anel volumétrico. Estas amostras foram saturadas por água destilada durante 24h, por meio da elevação gradual de uma lâmina de água, até atingirem cerca de 4,5cm da altura do anel. Em seguida, as amostras foram submetidas às tensões de 1, 2, 4 e 6 kPa na mesa de tensão, e posteriormente foram colocadas no aparelho extrator de Richards, sendo submetidas às tensões de 10, 33, 100, 500 e 1500 kPa. A partir das tensões aplicadas nas amostras de solo foi possível elaborar a curva característica de retenção de água.

Para determinação do conteúdo de água no solo, foi utilizada a equação (2), que expressa à umidade volumétrica do solo depois de submetida a diferentes tensões:

$$\theta = \frac{Va}{Vs} = \frac{Mu - Ms}{\frac{Dag}{Vs}} \quad (2)$$

Em que: θ = umidade volumétrica ($m^3.m^{-3}$); Va = volume de água (m^3); Vs = volume do solo que é igual ao volume do anel (m^3); Mu = massa da amostra após ser submetida à tensão/pressão utilizada (kg); Ms = massa da amostra do solo seca (kg) em estufa a 105 °C até atingir peso constante; Dag = densidade da água ($kg.m^{-3}$).

Para obtenção da curva de retenção de água no solo, nas profundidades em que as amostras de solo foram coletadas, após o equilíbrio dos potenciais em todos os pontos de tensões/pressões aplicadas, utilizou-se o modelo empírico de Van Genuchten (1980) representado pela equação (3), para ajuste da CRAS, a partir dos pontos experimentais obtidos.

O ajuste foi feito com o auxílio do programa Soil Water Retention Curve – SWRC (DOURADO NETO et al., 2001).

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha\Psi_m)^n]^m} \quad (3)$$

Em que: θ = umidade volumétrica ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$); θ_s = conteúdo de água na condição de solo saturado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$); θ_r = umidade residual ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$); Ψ = potencial mátrico da água no solo (kPa); α (m^{-1}), m , n = parâmetros empíricos da equação.

3.4 Variáveis analisadas

3.4.1 Análise granulométrica

As amostras deformadas de solos, foram colocadas para secar ao ar. Posteriormente, foram destorroadas (TSA), e depois peneiradas utilizando peneira de malha 2,00 mm, obtendo terra fina seca ao ar (TFSA).

Para determinação das frações areia (fina e grossa), silte e argila foi realizada análise granulométrica da TFSA, baseada na padronização de métodos para análise granulométrica (ALMEIDA et al., 2012), que tem como princípio a individualização das partículas minerais por meio da associação da dispersão física (agitação lenta) e da dispersão química (uso de dispersante). A separação da fração areia foi feita por peneiramento, e a separação das frações mais finas (silte e argila) foi por meio da sedimentação das partículas na suspensão da solução.

3.4.2 Determinação da densidade do solo

As medições da densidade do solo foram realizadas pelo método do anel volumétrico, sendo baseadas na razão entre a massa do solo seco e o volume do solo das amostras indeformadas, de acordo com a metodologia proposta pela Embrapa (2011), conforme a equação (4):

$$D_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (4)$$

Em que: D_s = densidade do solo ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); M_s = massa do solo seco (kg) em estufa a 105 °C até atingir peso constante; e V_s = volume do solo que é igual ao volume do anel (m^3).

3.4.3 Determinação da umidade na capacidade de campo

Para determinação da umidade na capacidade de campo, foi utilizado o extrator de Richards, em que as amostras indeformadas de solo após saturadas por 24h, foram submetidas a tensão de 10 kPa. Após o equilíbrio do volume de água no solo, na tensão utilizada, as amostras de solo foram pesadas, onde utilizando-se para o cálculo da umidade volumétrica na capacidade de campo a equação (5):

$$\theta_{cc} = \frac{V_a}{V_s} = \frac{M_u - M_s}{\frac{D_{ag}}{V_s}} \quad (5)$$

Em que: θ_{cc} = umidade volumétrica na capacidade de campo ($m^3 \cdot m^{-3}$); V_a = volume de água (m^3); V_s = volume do solo que é igual ao volume do anel (m^3); M_u = massa da amostra equilibrada a 10 kPa (kg); M_s = massa do solo seco (kg) em estufa a 105 °C até atingir peso constante; D_{ag} = densidade da água ($kg \cdot m^{-3}$).

3.4.4 Determinação da porosidade do solo e da distribuição de tamanho de poros

O cálculo da porosidade total do solo foi baseado no peso da amostra saturada (Figura 7), de acordo com os procedimentos propostos por Camargo (1986), utilizando a equação (5):

$$\alpha = \frac{V_p}{V_s} = \frac{M_{ss} - M_s}{\frac{D_{ag}}{V_s}} \quad (5)$$

Em que: α = porosidade total que é adimensional e em geral é expressa em porcentagem (%); V_p = volume de poros (m^3); V_s = volume do solo que é igual ao volume do anel (m^3); M_{ss} = massa do solo saturado (kg); M_s = massa do solo seco (kg) em estufa a 105 °C até atingir peso constante; D_{ag} = densidade da água ($kg \cdot m^{-3}$).



Figura 7. Amostras indeformadas de solo saturadas para determinação da porosidade total.

A microporosidade do solo foi determinada com auxílio da mesa de tensão, de acordo com a descrição de Camargo (1986) e Embrapa (2011).

Tendo como base esta mesa, uma placa de vidro, sobre as quais as amostras saturadas de solo foram colocadas (Figura 8), a fim de que o sistema de drenagem fosse estabelecido pela conexão da altura da mesa de tensão com o frasco de nível, semelhante ao princípio da mesa utilizada por Oliveira (1968).



Figura 8. Mesa de tensão para determinação da microporosidade do solo.

O cálculo da microporosidade do solo foi baseado na equação (6):

$$m_i = \frac{V_{mi}}{V_s} = \frac{M_{60} - M_s}{\frac{D_{ag}}{V_s}} \quad (6)$$

Em que: m_i = microporosidade do solo (%); V_{mi} = volume de microporos (m^3); V_s = volume do solo que é igual ao volume do anel (m^3); M_{60} = massa da amostra equilibrada a 60 cm de coluna de água (kg); M_s = massa do solo seco (kg) em estufa a 105 °C até atingir peso constante; D_{ag} = densidade da água ($kg.m^{-3}$).

O cálculo da macroporosidade foi realizado pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade do solo, como expressa na equação (7):

$$m_a = \alpha - m_i \quad (7)$$

Em que: m_a = macroporosidade (%); α = porosidade total (%); m_i = microporosidade (%).

3.4.5 Produtividade da cana-de-açúcar

Para medir a produtividade da cana-de-açúcar da área experimental e avaliar sua correlação com os atributos físicos do solo analisado, foi aplicado o método que estima o peso total da parcela por meio da multiplicação do número de colmos do ponto de amostragem pelo peso médio de dez colmos, conforme proposto por Gheller (1999), objetivando assim identificar a existência da variabilidade espacial da produtividade da cana-de-açúcar na área de estudo.

Este método de estimar a produtividade da cana-de-açúcar traz inúmeras vantagens se comparado com os métodos da pesagem total das parcelas experimentais, tais como: facilidade e rapidez na colheita e pesagem; obtenção de dados confiáveis de número de colmos por metro linear; uso menor de mão-de-obra; custo menor para aquisição dos equipamentos de pesagem; além da não interferência na programação de colheita da gleba, tanto para queima só do experimento ou, contrariamente, para não se queimar apenas o experimento, com isto havendo menor risco de fogo.

Em cada ponto amostral, foram escolhidas três linhas de cana-de-açúcar de 10 metros de comprimento. Nestas foram contados os números de colmos para o cálculo de seu peso médio. Posteriormente, foram colhidos 10 colmos ao acaso dentre as três linhas de cada ponto para a pesagem (Figura 9). A partir do peso médio estimado em cada ponto amostral foi calculada a produtividade por hectare.

As equações (8) e (9) expressam o cálculo da produtividade da cana-de-açúcar pelo método de Gheller (1999):

- Peso médio por colmo (pmc):

$$pmc = \frac{pf}{10} \quad (8)$$

- Peso estimado no ponto amostral (pep):

$$pep = pmc \times tcolmos \quad (9)$$

Em que: pmc = peso médio por colmo (kg); pf = peso do feixe com os 10 colmos (kg); pep = peso estimado no ponto amostral (kg); tcolmos = total de colmos contados nas três linhas.



Figura 9. Medição da produtividade da cana-de-açúcar na área de estudo: A. Formação dos feixes da cana-de-açúcar; B. Pesagem dos feixes da cana-de-açúcar contendo 10 colmos.

3.5 Estatística descritiva

A análise exploratória dos dados foi realizada por meio da estatística descritiva para determinação dos principais momentos estatísticos: média, mediana, desvio padrão, valores de máximos e mínimos, coeficientes de assimetria e curtose e coeficiente de variação.

A fim de obter informações sobre a dispersão e a distribuição das variáveis, a análise de normalidade dos dados foi testada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (KS) ao nível de 5% de probabilidade. Para análise exploratória, análise de normalidade dos dados, análise complementar, para identificar possíveis valores discrepantes (“*outliers*”) no conjunto de dados, bem como o estudo de correlações simples entre as variáveis, foi utilizado o software Statistica 7.0 (StatSoft, 2004).

Os dados discrepantes foram avaliados baseado no critério de Hoaglin et al. (1992), que considera discrepantes aqueles dados acima do limite superior (Ls) ou abaixo do limite inferior (Li), estimados pelas respectivas equações abaixo:

$$Ls = Qs + 1,5AP$$

$$Li = Qi - 1,5AP$$

Em que:

Ls = limite superior;

Li = limite inferior;

Qi = quartil inferior;

Qs = quartil superior;

AP = amplitude entre o 1º e o 3º quartil.

Depois de identificados, realizou-se análise visual da localização espacial destes valores dentro da grade amostral, para auxiliar na tomada de decisão de eliminação ou não destes valores discrepantes. Uma vez eliminados, os principais momentos estatísticos do atributo em análise foram determinados novamente.

A variabilidade dos atributos avaliados foi estimada pelos valores de coeficiente de variação (CV), que de acordo com a classificação de Warrick & Nielsen (1980), tem-se como baixa ($CV < 12\%$), média ($12\% < CV < 62\%$) e alta ($CV > 62\%$).

3.6 Análise geoestatística

Para análise da dependência espacial, na área de estudo, foi utilizada a geoestatística por meio de ajustes de semivariogramas (VIEIRA, 2000; ROBERTSON, 1998), com base na pressuposição de estacionaridade da hipótese intrínseca. Para construção e ajuste dos semivariogramas foi utilizado o programa GS+. Os critérios e procedimentos para ajuste do modelo do semivariograma foram feitos conforme Vieira et al. (1983).

Foram ajustados modelos matemáticos e definidos os parâmetros para os semivariogramas: a) efeito pepita (C_0), que é o valor de γ quando $h=0$; b) alcance da dependência espacial (α), que é a distância em que $\gamma(h)$ permanece aproximadamente constante, após aumentar com o aumento de h ; c) patamar (C_0+C_1) que é o valor de $\gamma(h)$ a partir do alcance e que se aproxima da variância dos dados, se ela existir.

Após a obtenção dos semivariogramas, foram testados os modelos esférico, gaussiano e exponencial descritos pelas equações (10 e 11), (12) e (13), respectivamente:

Modelo Esférico:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1.5 \left(\frac{h}{a} \right) - 0.5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad 0 < h \leq a \quad (10)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \quad h > a \quad (11)$$

Modelo Gaussiano:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp^{-\left(\frac{h^2}{a^2}\right)} \right] \quad h \neq 0 \quad (12)$$

Modelo Exponencial:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp^{-\left(\frac{h}{a}\right)} \right] \quad h \neq 0 \quad (13)$$

Quando foi detectada a dependência espacial de um atributo e sua manifestação em um modelo matemático adequado ao semivariograma, foi utilizada a técnica da krigagem para interpolação dos dados com variação mínima e sem tendência.

Os dados em que a geoestatística preliminar indicou tendência nos semivariogramas e mapas, esta foi retirada, para estimação dos resíduos, por meio das equações (14), (15) e (16):

Linear:

$$m(x) = A_0 + A_1\chi + A_2\gamma + A_3\chi\gamma \quad (14)$$

Quadrática ou parabólica:

$$m(x) = A_0 + A_1\chi + A_2\gamma + A_3\chi^2 + A_4\gamma^2 + A_5\chi\gamma \quad (15)$$

Cúbica:

$$m(x) = A_0 + A_1\chi + A_2\gamma + A_3\chi^2 + A_4\gamma^2 + A_5\chi\gamma + A_6\chi^3 + A_7\gamma^3 + A_8\chi^2\gamma + A_9\chi\gamma^2 \quad (16)$$

O grau de dependência espacial (GDE) foi analisado segundo Cambardella et al. (1994), em que se preconiza a proporção em porcentagem do efeito pepita (C_0) em relação ao patamar

(C_0+C_1), apresentando: (a) dependência forte $< 25\%$; (b) dependência moderada entre 25 e 75% e (c) dependência fraca $> 75\%$.

Utilizando o programa Surfer 11.0 (GOLDEN SOFTWARE, 2002), foram construídos os mapas de isolinhas, permitindo a visualização da distribuição e espacial dos atributos estudados. Para efeito de comparação espacial entre os atributos em estudo, quando detectada a presença de efeito pepita puro, foram construídos mapas de isolinhas usando os parâmetros de “default” do programa Surfer, que se baseia em um modelo de interpolação linear por krigagem.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas de retenção de água nas camadas 0-0,20 e 0,20-0,40 m para caracterizar o solo em estudo foram obtidas por meio de medidas simultâneas do conteúdo de água (θ) e do potencial mátrico (tensão) da água no solo, sendo este apresentado em escala logarítmica (Figura 10).

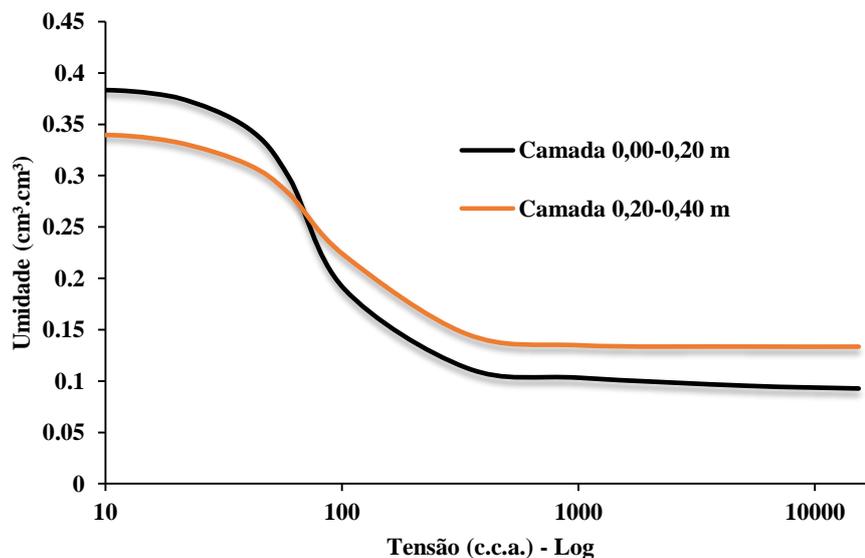


Figura 10. Curvas de retenção de água no solo das camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m ajustadas através do modelo de van Genuchten.

No ajuste das curvas de retenção de água, o modelo de van Genuchten apresentou alto poder explicativo, com coeficientes de determinação (R^2) de 97% e 93% para as camadas 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente. Portanto, este modelo caracteriza bem, para o solo

analisado, a relação entre o conteúdo de água no solo dentro do intervalo de potencial matricial avaliado.

Analisando as curvas de retenção de água nas duas camadas de solo (Figura 10) verifica-se que com o aumento da tensão, ocorreu diminuição do conteúdo de água no solo, onde as amostras de solo quando drenadas progressivamente. Observa-se primeiramente o esvaziamento dos macroporos seguidos pelos microporos. A maior inclinação da curva nas baixas tensões favoreceu assim a maior água disponível, especialmente na camada de 0,00-0,20 m, fato este relacionado a uma maior microporosidade nesta camada.

A maior retenção de água em baixas tensões, na camada de 0,00-0,20 m, pode ser explicada pela maior quantidade de partículas finas (argila e silte), promovendo menor densidade do solo para a camada. Em estudo para avaliar o comportamento da curva de retenção de água em dois tipos de latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar, Beutler et al., (2012) encontraram relação semelhante entre as partículas mais finas do solo e sua capacidade de reter água.

O ajuste das curvas características indica que o efeito do revolvimento do solo na camada superficial (0,00-0,20 m) proporcionou um aumento do conteúdo de água retido a baixas tensões, levando a uma maior água disponível para a cana-de-açúcar. Na camada mais compactada (0,20-0,40 m) observa-se uma redução na disponibilidade de água. Resultados semelhantes foram encontrados por Souza et al., (2014), analisando o comportamento da curva de retenção de água em três camadas de um solo de textura arenosa submetido a subsolagem.

A umidade residual (θ_r) nas camadas de 0,00-0,20 e de 0,20-0,40 m foi de $0,09 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ e $0,13 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, respectivamente (Tabela 2). De acordo com os valores deste parâmetro, observa-se que na camada mais compactada é necessária uma menor variação de sucção para remoção de mais água do solo, quando comparada com a camada superficial.

A umidade de saturação (θ_s) foi menor na camada de 0,20-0,40 m (Tabela 2). Consequentemente, nesta mesma camada, foi observado menor valor de porosidade total, já que este parâmetro foi determinado por meio da pesagem direta da amostra do solo saturado, antes de ser submetido ao processo de extração de água. A umidade de saturação (θ_s) é menor em camadas compactadas devido a menor porosidade total (REICHARDT & TIMM, 2008).

Pelos dados da Tabela 2, os valores médios de α para as camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m foram $0,00851$ e $0,00486 \text{ cm}^{-1}$, respectivamente. Costa et al. (2008) avaliando os modelos de ajuste e métodos para determinação da curva de retenção de água em um Latossolo, encontraram elevada variação para este parâmetro ($0,2075 \leq \alpha \leq 7,6777$), destacando que estes

valores altos para α , podem ter sido afetados pela agregação da argila. Carsel & Parrish (1988) encontraram valores de α variando com a textura do solo, sendo $0,008 \text{ cm}^{-1}$ em um solo argiloso e $0,145 \text{ cm}^{-1}$ em um solo arenoso.

Analisando a distribuição de água nas duas camadas de solo por meio das curvas de retenção, verificou-se que nas baixas tensões, o conteúdo de água no ponto de inflexão é maior na camada de 0,00-0,20 m, e que o comportamento da curva na camada de 0,20-0,40 m pode ser explicado pela maior compactação do solo, visto que esta camada apresenta maior densidade (Tabela 3). Ainda é relevante observar que a menor retenção de água próxima da tensão de 100 c.c.a. (10 kPa), na camada de 0,00-0,20 m, pode ser explicada pela maior porcentagem de macroporos nesta camada (quando comparada com a camada mais profunda), que proporcionou a drenagem da água.

As variações na curva de retenção ocorridas em função das diferentes profundidades do perfil relacionam-se com as diferentes estruturas do solo. A estrutura do solo também influencia a relação entre água armazenada e tensão (BRADY & WEIL, 2013). Solos bem estruturados possuem mais porosidade e maior capacidade de armazenamento de água quando comparados a solos mal estruturados e/ou compactados. A estrutura do solo influencia, predominantemente, a forma da curva de retenção de água na região em que as tensões estão entre 0 e 100 kPa (REICHARDT & TIMM, 2008).

Tabela 2. Valores médios dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980).

Camada (m)	θ_r	θ_s	α	n	m
0,00 - 0,20	0,08896	0,38896	0,00851	2,33507	0,57175
0,20 - 0,40	0,13342	0,34927	0,00486	1,83657	0,45550

θ_r = Umidade de residual ($\text{cm}^{-3} \cdot \text{cm}^{-3}$); θ_s = umidade de saturação ($\text{cm}^{-3} \cdot \text{cm}^{-3}$); α = alfa (cm^{-1}); **n** e **m** = parâmetros empíricos da equação (adimensional).

A fim de avaliar a distribuição e a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e da produtividade da cana-de-açúcar, realizou-se uma análise exploratória dos dados através da determinação dos principais momentos estatísticos (Tabela 3).

Com exceção do silte, os valores de média e mediana de todas as variáveis analisadas foram relativamente próximos para as duas camadas, o que sugere uma distribuição simétrica dos dados. Os dados de todas as variáveis obedeceram a distribuição Normal de frequências, comprovado pelo teste de Kolmogorov Smirnov ao nível de 5% de significância, exceto a θ_{cc} que demonstrou possuir distribuição de frequência do tipo Lognormal (Ln) para as duas camadas do solo, conforme os valores dos coeficientes de assimetria e curtose e do teste de

normalidade. Siqueira et al. (2015b) estudando a estacionaridade do conteúdo de água em um transecto com 128 pontos de amostragem, na mesma área de estudo, no ano de 2013, também encontraram uma distribuição do tipo Ln para a umidade do solo.

A produtividade média da cana-de-açúcar na área de estudo foi de 99,73 t.ha⁻¹ (Tabela 3). A produção nacional na safra 2013/2014 (CONAB 2014a) foi de 74,10 t.ha⁻¹, havendo uma produtividade na área de 34,59% superior à média nacional. A variância da produtividade da cultura da cana-de-açúcar na área de estudo foi de 188,50 t.ha⁻¹ (Tabela 3). Em uma análise realizada por Siqueira et al. (2015a) na mesma malha irregular, a variância da produtividade da cana-de-açúcar (safra 2012/2013) foi de 241,94 t.ha⁻¹, mostrando que a produtividade varia consideravelmente com as mudanças do solo ao longo da paisagem.

Tabela 3. Parâmetros estatísticos dos dados de produtividade da cana-de-açúcar (t.ha⁻¹) e dos atributos físicos do solo.

Variáveis	Camada		Média	Mediana	Variância	Mín. ⁶	Máx. ⁷	DP ⁸	Assimetria	Curtose	CV ⁹	D ¹⁰
	(m)											
Produtividade (t.ha ⁻¹)			99,730	98,240	188,500	64,367	125,345	13,730	-0,260	0,090	13,770	0,09 n
Ds ¹	0,00 - 0,20		1,679	1,673	0,007	1,494	1,867	0,082	0,125	-0,348	4,912	0,07 n
	0,20 - 0,40		1,698	1,690	0,005	1,549	1,859	0,069	0,159	-0,405	4,072	0,07 n
PT ²	0,00 - 0,20		41,869	41,521	22,494	33,589	53,903	4,743	0,433	-0,256	11,328	0,06 n
	0,20 - 0,40		39,914	40,164	34,404	26,245	52,170	5,865	-0,072	-0,135	14,695	0,08 n
Mi ³	0,00 - 0,20		38,027	37,514	18,802	28,579	48,168	4,336	0,399	-0,269	11,403	0,05 n
	0,20 - 0,40		36,716	36,409	32,003	23,855	48,263	5,657	-0,065	-0,147	15,408	0,08 n
Ma ⁴	0,00 - 0,20		3,704	3,882	2,333	0,916	7,581	1,527	0,136	-0,823	41,235	0,09 n
	0,20 - 0,40		3,303	3,291	0,625	1,596	5,400	0,791	0,449	0,053	23,943	0,07 n
θcc ⁵	0,00 - 0,20		20,061	19,937	20,850	6,948	37,432	4,566	0,213	2,135	22,762	0,10Ln
	0,20 - 0,40		17,151	18,351	35,780	1,510	29,224	5,982	-0,899	0,859	34,876	0,14Ln
Areia total (g.kg ⁻¹)	0,00 - 0,20		712,791	716,800	1384,421	624,000	796,800	37,208	-0,228	-0,179	5,220	0,11 n
	0,20 - 0,40		722,796	724,000	768,935	656,800	796,800	27,729	-0,166	-0,264	3,836	0,09 n
Areia fina (g.kg ⁻¹)	0,00 - 0,20		293,732	296,500	863,846	222,880	348,940	29,391	-0,471	-0,329	10,006	0,09 n
	0,20 - 0,40		249,979	253,700	1772,655	145,940	336,940	42,103	-0,212	-0,493	16,843	0,05 n
Areia grossa (g.kg ⁻¹)	0,00 - 0,20		423,557	421,770	2021,436	316,460	524,540	44,960	0,016	-0,195	10,615	0,06 n
	0,20 - 0,40		467,315	468,200	1798,810	372,780	566,840	42,412	0,041	0,011	9,076	0,05 n
Argila (g.kg ⁻¹)	0,00 - 0,20		254,616	256,000	727,735	183,200	323,200	26,977	-0,322	0,210	10,595	0,11 n
	0,20 - 0,40		253,181	256,000	443,809	216,000	290,400	18,136	-0,176	-0,504	7,163	0,13 n
Silte (g.kg ⁻¹)	0,00 - 0,20		32,575	20,000	960,756	0,000	105,600	30,996	0,919	-0,151	95,152	0,18 n
	0,20 - 0,40		25,600	20,000	504,713	0,000	85,600	22,466	0,799	-0,049	87,757	0,15 n

¹ Densidade do solo (kg.dm⁻³); ² porosidade total (%); ³ microporosidade (%); ⁴ macroporosidade (%); ⁵ umidade volumétrica na capacidade de campo (%); ⁶ valor mínimo; ⁷ valor máximo; ⁸ desvio padrão; ⁹ coeficiente de variação (%); ¹⁰ desvio máximo em relação à distribuição normal; **n**: dados que apresentaram distribuição normal pelo teste de Kolmogorov-Smirnov à 5% de significância; **Ln**: dados que apresentaram distribuição Lognormal pelo teste de Kolmogorov-Smirnov à 5% de significância.

O valor do CV para a produtividade (13,77%) indicou moderada variabilidade na área de estudo. Valor mediano de CV também foi encontrado por Siqueira et al. (2015a) em estudo sobre a variabilidade espacial da cana-de-açúcar.

Como já dito anteriormente, o teste de Kolmogorov-Smirnov mostrou a normalidade dos dados para a produtividade. Segundo Gonçalves et al. (2011), para a estimativa por krigagem, é interessante a normalidade dos dados na avaliação da dependência espacial, sendo mais importante sua utilização para verificar a não tendência dos dados.

Analisando as médias da densidade do solo (Ds) e da porosidade total (PT) (Tabela 3), observou-se um comportamento inverso comparando as duas camadas. A camada 0,00-0,20 m apresentou menor densidade e maior porosidade total, e a camada 0,20-0,40 m o valor da densidade do solo foi maior e da porosidade total menor. Tavares et al. (2012) estudando os atributos físicos de um Argissolo coeso em duas profundidades sob cultivo de cana-de-açúcar, em um lote da mesma usina deste estudo, encontraram o mesmo comportamento para estas variáveis.

O coeficiente de variação (CV) para a Ds de acordo com a classificação de Warrick e Nielsen (1980) nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m foi de 4,91 e 4,07 %, respectivamente, sendo considerado baixo (Tabela 3). Campos et al., (2007a) avaliando a variabilidade espacial dos atributos físicos e hídricos de um Espodossolo na Zona da Mata de Pernambuco, também encontraram baixa variabilidade para a Ds (3,92 %).

A Ds é uma das propriedades físicas que caracteriza o estado de compactação do solo (BONINI et al., 2011). Os valores encontrados (Tabela 4) se apresentam na faixa de 1,68 e 1,70 kg.dm⁻³ para as camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente; esses valores podem ser considerados altos. Klein (2006) constatou que valores a partir de 1,33 kg.dm⁻³ limitam o crescimento radicular das culturas, entretanto Siqueira et al., (2008) consideram que não existe um consenso quanto ao valor crítico da densidade do solo.

Os elevados valores da densidade do solo podem ser resultantes de pressões exercidas pelo tráfego de máquinas e implementos (CENTURION & DEMATTÊ, 1985). Com o aumento da intensidade de uso do solo há aumento da Ds. Viana et al., (2011) encontraram maior valor de Ds em uma área com produção de cana-de-açúcar quando comparado com solos sob mata nativa, e cultivados com pastagem e mandioca. Resultados semelhantes também foram obtidos por Araujo et al., (2004), que encontraram Ds maior para área cultivada com cana de açúcar, em comparação com a área sob mata nativa.

Com o aumento da densidade do solo na camada 0,20-0,40 m ocorreu uma redução da porosidade total, macro e microporosidade (Tabela 3). O menor valor da densidade do solo na camada de 0,00-0,20 m pode estar associado a influência do maior teor de matéria orgânica nesta camada superficial (Tabela 1) (SOUZA e ALVES, 2003).

De modo geral, os solos arenosos possuem porosidade total na faixa de 32 a 47% (REICHARDT; TIMM, 2004). Os dados da porosidade total da área estudada (Tabela 3), permitem observar que os valores da média para esta variável, nas duas camadas, estão dentro da faixa considerada, visto que o solo em estudo é um espodossolo, que se caracteriza por ter textura arenosa.

Os valores das médias, nas duas camadas, da microporosidade (38,04 e 36,72 %) foram maiores do que os da macroporosidade (3,70 e 3,30 %). Devido ao aumento da proporção de microporos em relação aos macroporos é comum haver maior retenção de água em solos mais densos. A redução da macroporosidade e o aumento da microporosidade pode evidenciar maiores limitações quanto ao arranjo dos poros no solo (VASCONCELOS et al., 2011). Cabe destacar que o baixo valor da macroporosidade para o solo estudado, pode estar atrelado ao efeito da matéria orgânica no solo, e pelo fato da área de estudo ser de deposição de sedimentos (SOUZA e ALVES, 2003).

Conforme Baver et al. (1972), um solo apresenta condições ideais de aeração para o desenvolvimento das plantas quando a macroporosidade é superior a 10%. Portanto, o valor de macroporosidade para as duas camadas do solo em estudo, encontra-se abaixo dessas condições ideais, o que sugere que o solo não apresenta condições satisfatórias de aeração para o desenvolvimento da cana-de-açúcar. Entretanto, vale ressaltar que esta observação não é válida para todas as culturas, uma vez que existem plantas que são tolerantes a níveis baixos de aeração do solo.

Souza et al. (2010), ao avaliarem a micromorfologia do solo e sua relação com atributos físicos e hídricos, em Espodossolos e Latossolos, verificaram que o cultivo intensivo da cultura da cana-de-açúcar reduziu significativamente a porosidade do solo, com maior evidência na macroporosidade, encontrando valores de até 3% para os macroporos.

A microporosidade é influenciada pela textura do solo (SILVA & KEY, 1997). Foi possível observar esta influência neste experimento, pelo fato de que na camada de 0,00-0,20m, com o aumento relativo na quantidade das frações silte e argila, obteve-se um aumento de microporos, entretanto com a redução das frações finas, na camada 0,20-0,40 m, ocorreu uma redução dos poros capilares.

Relacionando as camadas (0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m) do solo, os dados de θ_{cc} da área de estudo apresentaram valores de média e variância próximos, indicando a tendência à um equilíbrio entre as amostras e a presença da estacionaridade do conteúdo de água no solo. Reichart & Timm (2004) destacam que o indicativo de um equilíbrio estável da umidade do

solo está associado à proximidade entre os valores de média e variância. Entretanto, Stevens et al. (2015) caracterizam a estacionaridade como um fenômeno dependente apenas da média.

Os valores das médias para os atributos texturais (areia, silte e argila) confirmaram que o solo da área de estudo apresenta uma textura arenosa. Os baixos valores do CV para os atributos texturais, exceto para o silte, está associado com o processo de formação do solo na área, baseado na sedimentação das partículas (BRASIL, 1969, 1972). Além do fato da textura ser um atributo físico estável com baixa variação no espaço (CORWIN e LESCH, 2005b).

Ressalta-se que esta alta heterogeneidade para o silte em relação à areia pode estar relacionada com sua maior mobilidade no solo (SANTOS et al., 2012). O alto valor de CV para o silte pode ser atribuído ao fato de que todos os possíveis erros da análise granulométrica recaírem sobre esta fração, uma vez que ela foi calculada por diferença. Tavares et al., (2012) estudando a variabilidade das frações granulométricas do solo cultivado com cana-de-açúcar na Região da Zona da Norte de Pernambuco, encontraram alta variabilidade para o silte. Seguindo a mesma linha de justificativa para o alto CV obtido para o silte, pode-se inferir, observando os valores deste coeficiente que os erros da análise da porosidade do solo foram atribuídos a macroporosidade, já que ela apresentou maior valor de CV quando comparada com a porosidade total e a microporosidade, que também foi calculada por diferença.

Embora os Espodossolos possuam materiais de origem normalmente muito pobres em argila, resultando em solo de textura arenosa ao longo do perfil, o valor da fração argila na camada 0,20-0,40 m foi superior ao da areia fina (Tabela 3), podendo este resultado estar associado ao intenso revolvimento do solo durante seu preparo, sendo comum em uma área com produção de cana-de-açúcar. Nas duas camadas de solo, destacou-se maior proporção de areia grossa comparada com a proporção de areia fina.

De acordo com a classificação de Warrick e Nielsen (1980) os valores de CV para θ_{cc} do solo nas duas camadas (Tabela 3) foram classificados como medianos ($12\% < CV < 62\%$). (CORWIN e LESCH, 2005b) destacam que θ_{cc} é um atributo dinâmico do solo, que varia com a profundidade e com o posicionamento na paisagem, em geral apresentando variabilidade de mediana a alta. Siqueira et al. (2015b) em estudo na mesma área, no ano de 2013, encontraram valores de CV altos, 106,99 e 98,40 % para as camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m do solo, respectivamente.

Observando os valores da θ_{cc} do solo estudado (Tabela 3), verificou-se uma maior retenção de água na camada 0,00-0,20 m, visto que nesta camada superficial o teor de matéria orgânica é maior do que nas camadas mais profundas (Tabela 1). A matéria orgânica tem uma

área superficial específica maior que areia, resultando em uma capacidade de retenção de água muito maior. Desta forma, a água adicionada ao solo fica concentrada próxima das partículas orgânicas, e dificulta a formação de películas de água sobre a superfície dos grãos de areia (BRAIDA et al., 2006).

Na geoestatística, a hipótese intrínseca garante a estacionaridade do semivariograma, sem apresentar restrição em relação à existência de variância finita. A estacionaridade considera que todas as amostras pertencem à mesma população, permitindo que um experimento possa ser repetido (VIEIRA, 2000; SIQUEIRA et al, 2008). Desta forma, os resultados da análise geoestatística mostram se os semivariogramas ajustados são estacionários e seus parâmetros de ajuste (Tabela 4 e Figuras 11, 12, 13 e 14).

Os resultados geoestatísticos demonstraram que para os dados da maioria dos atributos não foi possível fazer nenhum tipo de ajuste. Para as duas camadas, os dados de areia total, areia fina, areia grossa e silte apresentaram efeito pepita puro, ou seja, a amostragem não foi suficiente para detectar variabilidade espacial. O mesmo comportamento ainda foi observado para os dados da PT, Mi, Ma e argila na camada de 0,00-0,20 m. O efeito pepita puro indica que a distribuição espacial do atributo na área é aleatória, homogênea ou a malha amostral utilizada não possui pontos suficientes para detectar a dependência que, caso exista, será manifestada a distâncias menores que o menor espaçamento entre amostras (GUIMARÃES, 2004).

Siqueira et al., (2015a) estudando a correlação espacial entre a produtividade da cana-de-açúcar, da condutividade elétrica do solo e da textura do solo na mesma área no ano de 2011, encontraram resultados semelhantes ao do presente trabalho para o comportamento espacial das frações texturais do solo nas duas camadas.

De acordo com a Tabela 4, a análise geoestatística demonstrou dependência espacial para a produtividade da cana-de-açúcar, podendo ser indicado pelo ajuste do modelo esférico ao semivariograma. Observou-se, portanto, que a distribuição dos dados não foi aleatória no espaço. O grau de dependência espacial foi determinado de acordo com a classificação de Cambardella et al. (1994), e indicou fraca dependência espacial ($GDE > 75\%$) para a produtividade (Tabela 4).

O alcance da produtividade da cana-de-açúcar foi de 70 m, indicando que até este valor a produtividade é dependente da distância e a partir dele as amostras tornam-se independentes. Esse parâmetro do semivariograma pode ser mais bem visualizado na Figura 14E. O alcance é uma medida importante para o planejamento e avaliação experimental, auxiliando na definição do procedimento de amostragem (SOUZA et al., 2004). O alcance da dependência espacial é o

parâmetro do semivariograma que indica a distância máxima dentro da qual a variável analisada está correlacionada, garantindo que todos os pontos vizinhos dentro de um círculo cujo raio é dado pela sua magnitude, sejam tão semelhantes que podem ser usados para estimar valores da variável, que estejam em qualquer outro ponto dentro do seu domínio (VIEIRA & LOMBARDI NETO, 1995).

As variáveis estudadas apresentaram diferentes valores de alcance, mostrando três grupos de valores próximos: de 25 a 42 m (Ma, Ds e θ_{cc} - na camada mais profunda); de 55 a 57 m (Mi, PT - na camada mais profunda e θ_{cc} - na camada superficial) e de 70 a 73 m (produtividade, Ds - na camada superficial e argila - na camada mais profunda do solo). Estes resultados demonstraram que o alcance da dependência espacial depende da variável em estudo e que, se as amostragens realizadas nesta área considerassem estes alcances, os dados obtidos poderiam representar melhor a realidade da área amostrada (GREGO & VIEIRA, 2005).

Tabela 4. Parâmetros de ajuste dos semivariogramas para a produtividade e os atributos físicos do solo.

Variáveis	Camada (m)	C ₀	C ₁	a	Modelo	R ²	SQDP	GDE
Produtividade (t.ha ⁻¹)		168,000	30,000	70,000	Esférico	0,650	25,097	84,848
Ds (kg.dm ⁻³)	0,00 - 0,20	0,0021	0,011	73,000	Esférico	0,774	1,85E-06	16,861
	0,20 - 0,40	0,0059	0,0025	35,000	Gaussiano	0,695	6,9255E-07	74,683
PT (%)	0,00 - 0,20	*	*	*	*	*	*	*
	0,20 - 0,40	25,000	22,000	57,000	Esférico	0,276	33,546	53,191
Mi (%)	0,00 - 0,20	*	*	*	*	*	*	*
	0,20 - 0,40	21,000	27,000	55,000	Esférico	0,252	42,269	43,750
Ma (%)	0,00 - 0,20	*	*	*	*	*	*	*
	0,20 - 0,40	0,008	0,0042	25,000	Gaussiano	0,444	1,47965E-06	65,574
θ_{cc} (%)	0,00 - 0,20	9,800	20,000	56,000	Esférico	0,349	22,880	32,886
	0,20 - 0,40	22,000	16,000	42,000	Esférico	0,173	20,956	57,895
Areia total (g.kg ⁻¹)	0,00 - 0,20	*	*	*	*	*	*	*
	0,20 - 0,40	*	*	*	*	*	*	*
Areia fina (g.kg ⁻¹)	0,00 - 0,20	*	*	*	*	*	*	*
	0,20 - 0,40	*	*	*	*	*	*	*
Areia grossa (g.kg ⁻¹)	0,00 - 0,20	*	*	*	*	*	*	*
	0,20 - 0,40	*	*	*	*	*	*	*
Argila (g.kg ⁻¹)	0,00 - 0,20	*	*	*	*	*	*	*
	0,20 - 0,40	0,690	3,792	70,000	Exponencial	0,850	0,0195	15,395
Silte (g.kg ⁻¹)	0,00 - 0,20	*	*	*	*	*	*	*
	0,20 - 0,40	*	*	*	*	*	*	*

C₀: Efeito pepita; C₁: Variância estrutural; a: Alcance; R²: Coeficiente de determinação; SQDP: Soma de quadrados de desvios ponderados; GDE: Grau de dependência; * Efeito pepita puro, não permitindo ajuste.

Os semivariogramas das variáveis analisadas foram ajustados, em sua maioria, ao modelo esférico, confirmando a predominância deste modelo nos trabalhos de ciência do solo (GREGO & VIEIRA, 2005). Um aspecto relevante que merece ser comentado, foi o fato dos

dados da macroporosidade na camada de 0,20-0,40 m terem apresentado ausência de estacionaridade, o que dificulta, segundo Guimarães (2004), o ajuste de modelos adequados ao comportamento espacial da variável. Como possibilidade para detectar a variabilidade espacial deste atributo, os dados foram submetidos à transformação logarítmica, e depois de transformados foi possível detectar variabilidade espacial para a macroporosidade e o modelo ajustado foi o gaussiano.

O grau de dependência espacial (GDE) (Tabela 4) evidencia que existe forte ou moderada dependência para a maioria das variáveis, com exceção da produtividade da cana-de-açúcar. Segundo Cambardella et al. (1994), variáveis que apresentam forte grau de dependência espacial são mais influenciadas por propriedades intrínsecas do solo, ou seja, fatores relacionados à formação do solo (mineralogia, granulometria). De modo que, dependências espaciais moderadas e fracas podem estar relacionadas à ação antrópica, como aração e gradagem.

Os semivariogramas ajustados da Ds nas duas camadas (Figuras 11A e 11B), demonstraram uma semelhança estrutural entre eles, onde seus valores de pares de semivariância mostraram comportamentos parecidos quando plotados. Além de ser possível verificar tal semelhança através dos parâmetros da estatística descritiva (Tabela 3). Entretanto, a Ds na camada de 0,00-0,20 m representou melhor o fenômeno da densidade do solo quando comparada à camada 0,20-0,40 m, pois seus valores de efeito pepita (C_0) e de variância estrutural (C_1) são mais baixos, e o seu grau de dependência foi classificado como forte de acordo com Cambardella et al. (1994), indicando maior dependência entre as amostras na camada superficial.

Observando os semivariogramas da PT do solo (Figuras 11C e 11D), é possível perceber na camada mais profunda o crescimento da semivariância com o aumento da distância, reforçando a ideia da estacionaridade. Entretanto, não verificou-se este comportamento para a mesma variável na camada mais superficial, não detectando variabilidade espacial entre os pontos amostrais. Ainda, relacionado aos dados da porosidade do solo, percebeu-se uma maior dependência entre as amostras para a macroporosidade na camada de 0,20-0,40 m, se comparada com a PT e a microporosidade, visto que para os macroporos os parâmetros geoestatísticos C_0 e C_1 são consideravelmente mais baixos (Tabela 4).

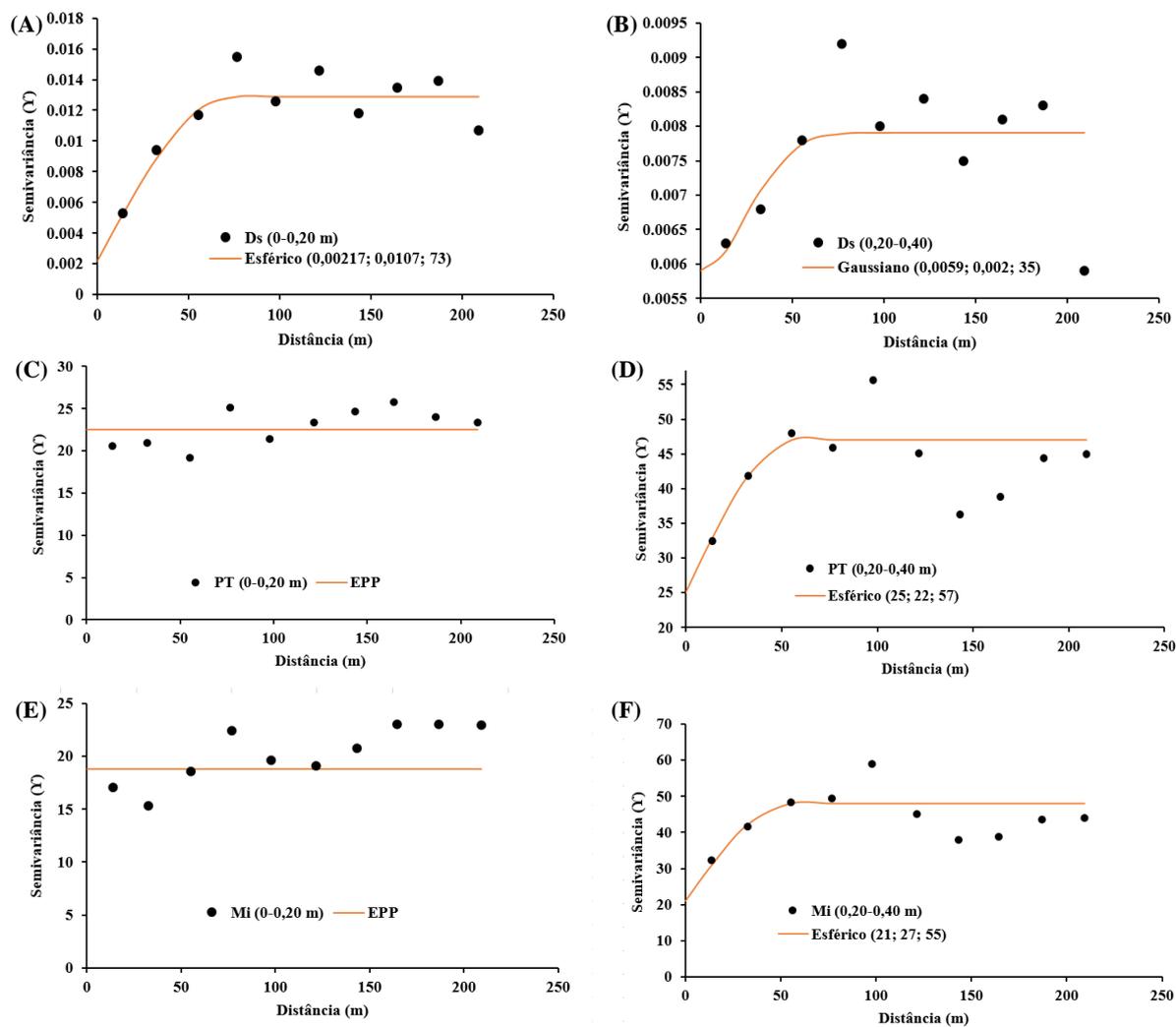


Figura 11. Semivariogramas ajustados para a densidade do solo (A) (0,00-0,20 m), e (B) (0,20-0,40 m), porosidade total (C) (0,00-0,20 m), e (D) (0,20-0,40 m), e microporosidade (E) (0,00-0,20 m), e (F) (0,20-0,40 m).

Com os dados obtidos através da estatística descritiva dos atributos analisados e dos parâmetros de ajuste dos semivariogramas, ainda foi possível fazer uma analogia, conforme apresentado na Tabela 5. Verifica-se que os atributos que apresentaram valores de variância e coeficiente de variação (CV) altos, também apresentaram valores de efeito pepita (C_0) elevados. Sendo possível prever por meio da estatística descritiva parâmetros que apresentaram valores de variabilidade não detectada pelo esquema de amostragem, indicando maior descontinuidade entre as amostras.

Os valores de coeficiente de variação possibilitam indicar a variabilidade dos dados. Entretanto altos valores de efeito pepita indicam uma maior descontinuidade entre as amostras, não sendo possível detectar variabilidade durante o processo amostragem (CARVALHO et al., 2012). Medindo a continuidade das amostras em distância menores do que o espaçamento amostrado, o efeito pepita (C_0) depende do instrumento e da metodologia

utilizada para medir um atributo, logo este fato deve ser levado em consideração no planejamento da amostragem do solo.

Com relação aos dados de umidade do solo, por meio da análise de variância, do coeficiente de variação e do efeito pepita foi possível verificar que os alcances de 56 e 42 m, para as camadas de 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m, respectivamente, foram suficientes para representar a área de estudo (Tabela 5 e Figuras 12A e 12B). Ainda observando o comportamento dos dados da umidade do solo, pode-se verificar que a umidade da camada superficial do solo apresenta menor valor de coeficiente de variação (CV) e efeito pepita (C_0), apresentando também menor grau de dependência espacial (GDE), indicando maior dependência espacial de acordo com Cambardella et al. (1994) e menor descontinuidade entre as amostras quando comparada com a umidade da camada mais profunda do solo.

Tabela 5. Relação entre variância, coeficiente de variação (CV) e efeito pepita (C_0) para os atributos que apresentaram dependência espacial.

Variáveis	Camada (m)	Variância	CV (%)	C_0
Produtividade (t.há ⁻¹)		188,5	13,770	168,000
Ds (kg.dm ⁻³)	0,00 - 0,20	0,007	4,912	0,0021
	0,20 - 0,40	0,005	4,072	0,0059
PT (%)	0,20 - 0,40	34,404	14,695	25,000
Mi (%)	0,20 - 0,40	32,003	15,408	21,000
Ma (%)	0,20 - 0,40	0,625	23,943	0,008
Θcc (%)	0,00 - 0,20	20,850	22,762	9,800
	0,20 - 0,40	35,780	34,876	22,000
Argila (g.kg ⁻¹)	0,20 - 0,40	443,809	7,163	0,900

CV: Coeficiente de Variação (%); C_0 : Efeito pepita.

Tavares et al. (2012) estudando os parâmetros físicos, mecânicos e químicos do solo e sua estrutura de dependência espacial em uma área com cultivo de cana-de-açúcar, encontraram resultados semelhantes ao do presente estudo para a umidade de solo nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m.

A maior parte dos atributos granulométricos do solo apresentou efeito pepita puro, com exceção da argila na camada de 0,20-0,40 m, que teve variabilidade espacial detectada com o ajuste do modelo exponencial como pode-se observar nos semivariogramas das Figuras 13 e 14.

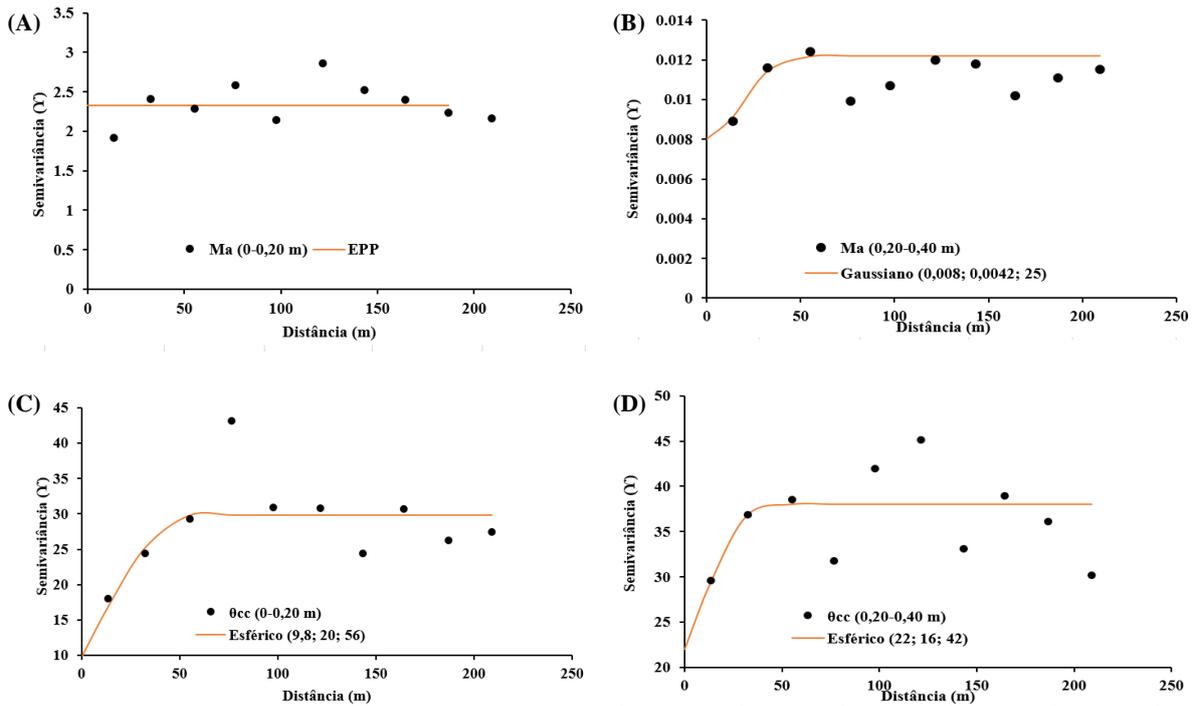


Figura 12. Semivariogramas ajustados para a macroporosidade (A) (0,00-0,20 m), e (B) (0,20-0,40 m), e umidade volumétrica (C) (0,00-0,20 m), e (D) (0,20-0,40 m).

O segundo maior alcance dos atributos analisados foi observado para argila na camada de 0,20-0,40 m (70 m) (Tabela 5 e Figura 14B), demonstrando que este atributo, dentre os atributos que compõem a textura do solo, foi o que apresentou menor variabilidade e maior continuidade espacial, garantindo melhor precisão nas estimativas em locais não amostrados. Uma das possíveis causas desta continuidade pode estar associada ao material de origem do solo e ação do processo de intemperismo. O mesmo foi observado por Campos et al. (2007b), que destacaram o revolvimento do solo como um possível homogeneizador das partículas, contribuindo assim para valores maiores de alcance.

A densidade do solo e a macroporosidade na camada mais profunda do solo tiveram seus dados ajustados ao modelo gaussiano (Tabela 4). O modelo gaussiano é representativo de fenômenos extremamente contínuos, indicando suave variação em pequenas distâncias de observação. Siqueira et al., (2015a) analisando a relação espacial entre a produtividade da cana-de-açúcar, da condutividade elétrica e da textura do solo na mesma área de estudo em 2011, também não detectaram variabilidade espacial para a maioria das frações granulométricas e encontraram o melhor ajuste dos semivariogramas com o modelo gaussiano para a maioria dos dados analisados. O modelo gaussiano também foi o que melhor se ajustou ao conjunto de dados em um estudo desenvolvido por Bottega et al. (2013) para avaliar a variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos de um Latossolo Vermelho.

De acordo com a classificação de Cambardella et al. (1994) a argila na camada de 0,20-0,40 m apresentou forte grau de dependência espacial (GDE < 25%), indicando elevada relação entre as amostras para este atributo na área experimental.

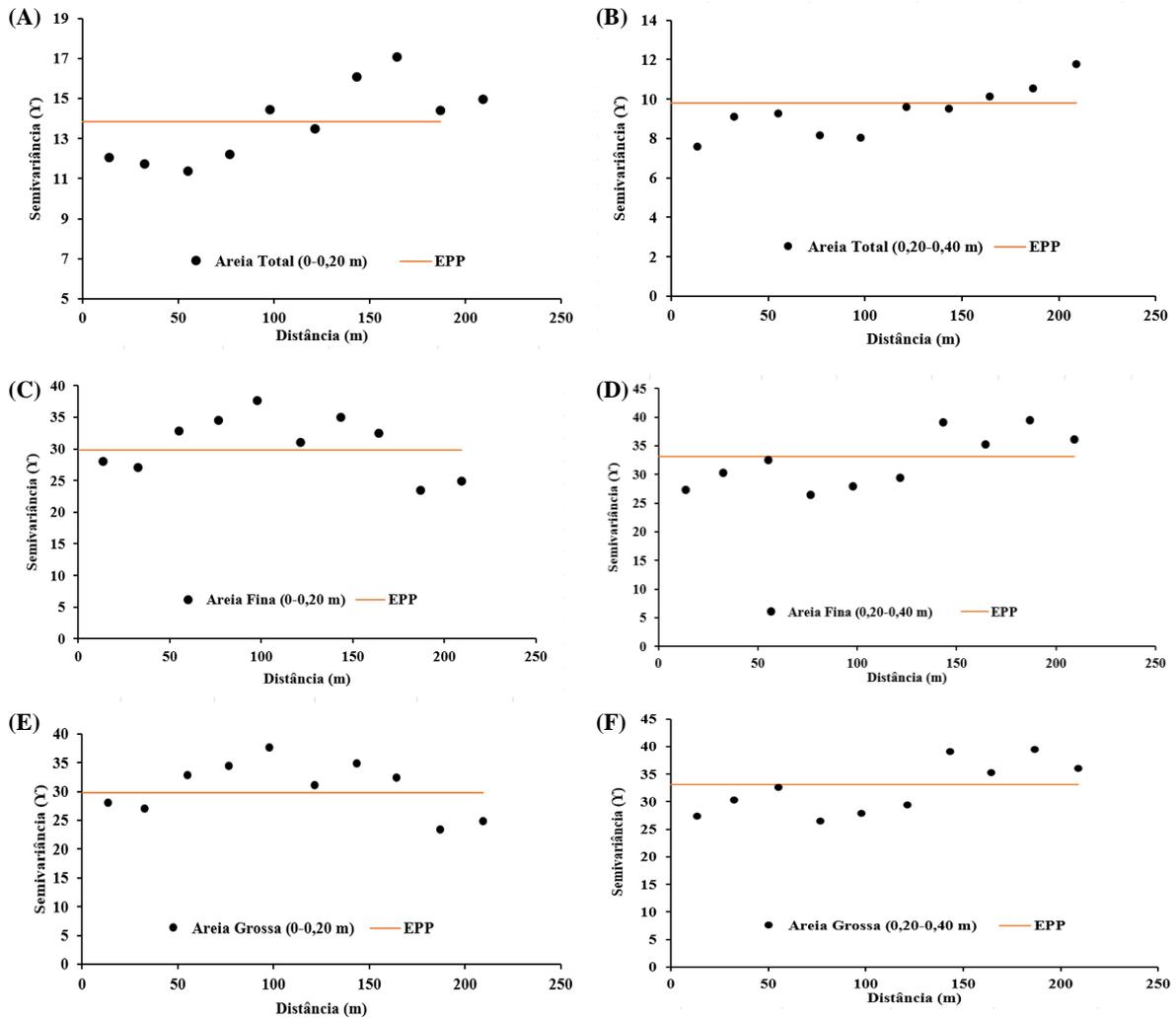


Figura 13. Semivariogramas ajustados para os atributos granulométricos do solo: areia total (A) (0,00-0,20 m), e (B) (0,20-0,40 m), areia fina (C) (0,00-0,20 m), e (D) (0,20-0,40 m), e areia grossa (E) (0,00-0,20 m), e (F) (0,20-0,40 m).

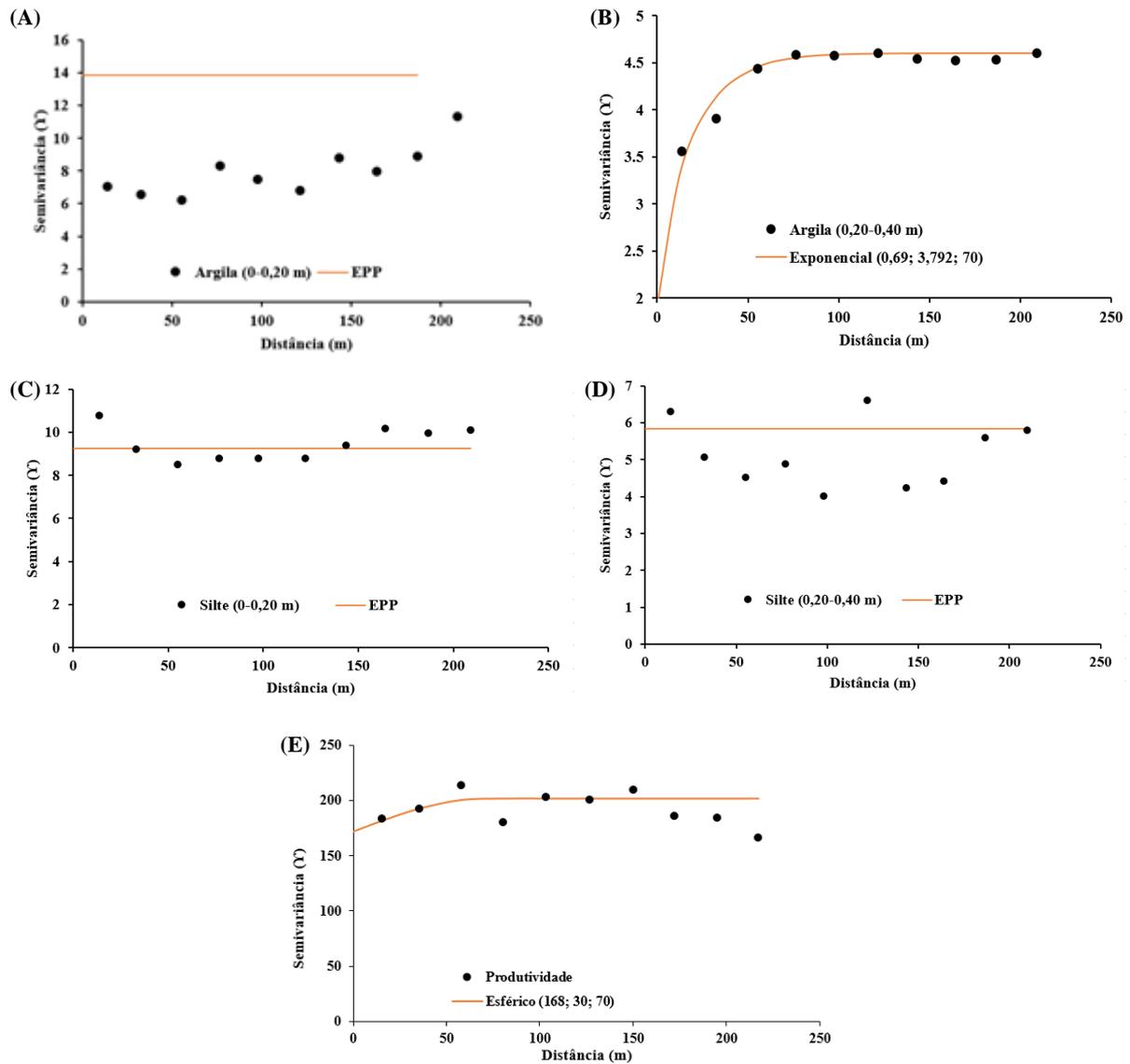


Figura 14. Semivariogramas ajustados para os atributos granulométricos do solo: argila (A) (0,00-0,20 m), e (B) (0,20-0,40 m), e silte (C) (0,00-0,20 m), e (D) (0,20-0,40 m), e para a produtividade da cana-de-açúcar (E).

Para visualização da distribuição espacial, foram apresentados os mapas de isolinhas dos atributos analisados (Figuras 15, 16, 17 e 18). Pela observação da distribuição espacial das variáveis, foi observado comportamento espacial inverso entre Ds e PT, principalmente na camada de 0,00-0,20 m, onde os maiores valores da Ds coincidiram com os menores valores da PT (Figuras 15A e 15C).

Como a porosidade total é afetada pelo arranjo das partículas do solo, quando este é submetido a uma pressão, como ocorre no processo de compactação, as partículas tendem a se arranjar de forma mais densa (REICHARDT & TIMM, 2004) afetando a quantidade, o tamanho e a orientação dos poros (RICHART et al., 2005). Tavares et al. (2012) estudando os

parâmetros físicos do solo e sua estrutura de dependência espacial em uma área com cultivo de cana-de-açúcar, encontraram distribuição espacial de comportamento semelhante para a Ds e PT.

Pela distribuição dos mapas da Ds, verificou-se que na camada de 0,00-0,20 m a densidade apresentou menores valores ($1,3 \text{ kg.dm}^{-3}$) quando comparada com a camada de 0,20-0,40 m ($1,6 \text{ kg.dm}^{-3}$) (Figuras 15A e 15B), sendo possível destacar que o manejo do solo pelo preparo convencional, que busca o revolvimento e a descompactação do solo na faixa arável promove a compactação da faixa mais profunda do solo, devido ao peso do trator.

Nota-se que o mapa da produtividade (Figura 16C) apresentou, na maior parte da área, valores de produtividade superiores a $96,00 \text{ t.ha}^{-1}$, que representam valores próximos a média da produtividade na área ($99,73 \text{ t.ha}^{-1}$), alcançando valores de até 126 t.ha^{-1} , coincidindo com maiores valores de umidade do solo quando comparados às demais zonas, confirmando a influência hídrica para a cultura e a sua produtividade (DANTAS et al., 2006).

Para a θ_{cc} , maiores valores de umidade foram observados na primeira camada de solo, no mesmo local do mapa (Figura 16A). Como já comentado, a porosidade do solo diminuiu em função do aumento da densidade, no entanto, a microporosidade não aumentou relativamente com o aumento da densidade do solo para as camadas em estudo, fato que de acordo com Tormena et al., (2004) pode ser explicado descrevendo que uma maior coalescência dos agregados em função do aumento da densidade resulta em uma matriz do solo mais densa.

Observando os mapas da microporosidade, macroporosidade e umidade volumétrica da camada de 0,20-0,40 m (Figuras 15F, 15H e 16B), verificou-se na faixa mais estreita da área e com maior cota topográfica que com o aumento da macroporosidade, teve-se diminuição da microporosidade e conseqüentemente menor retenção de água, acarretando em menores produtividades nesta faixa. Estes resultados convergem para descrever o comportamento hídrico em locais que predominam maior proporção de macroporos, responsáveis por favorecer a infiltração de água, permitindo a drenagem, e menor proporção de microporos, responsáveis pela retenção de água no solo.

Com o aumento da densidade do solo, ocasionando maior compactação, ocorreu redução da macroporosidade, como verifica-se nos mapas da Ds e Ma na camada 0,00-0,20 m (Figuras 15A e 15G). A alteração da estrutura, quando o solo sofre compressão, resulta em diminuição dos poros maiores que ocorrem, na maioria dos casos, entre os agregados do solo (SOARES et al., 2015).

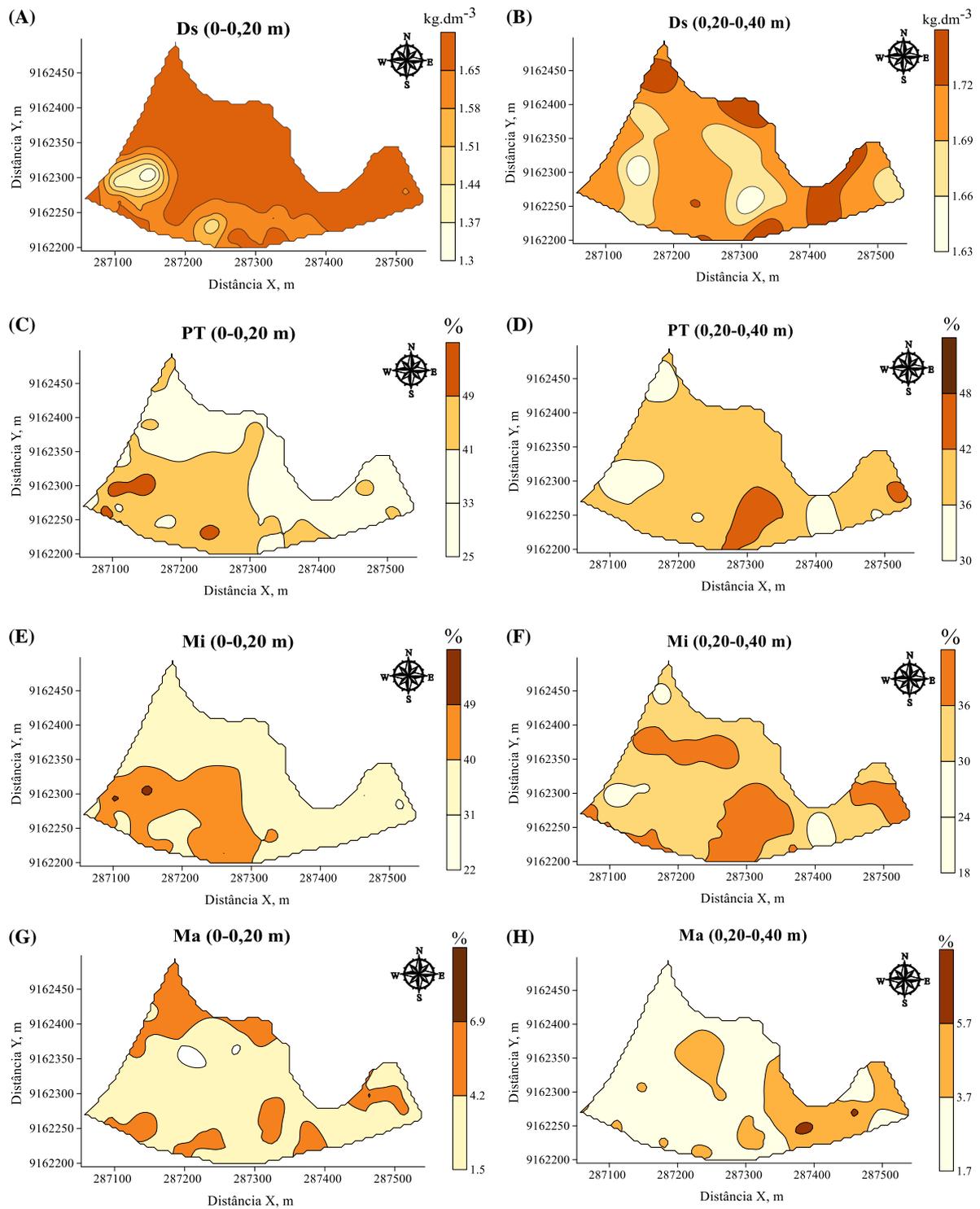


Figura 15. Mapas de isolinhas para a densidade do solo (A) (0,00-0,20 m), e (B) (0,20-0,40 m), porosidade total (C) (0,00-0,20 m), e (D) (0,20-0,40 m), microporosidade (E) (0,00-0,20 m), e (F) (0,20-0,40 m), e macroporosidade (G) (0,00-0,20 m), e H (0,20-0,40 m).

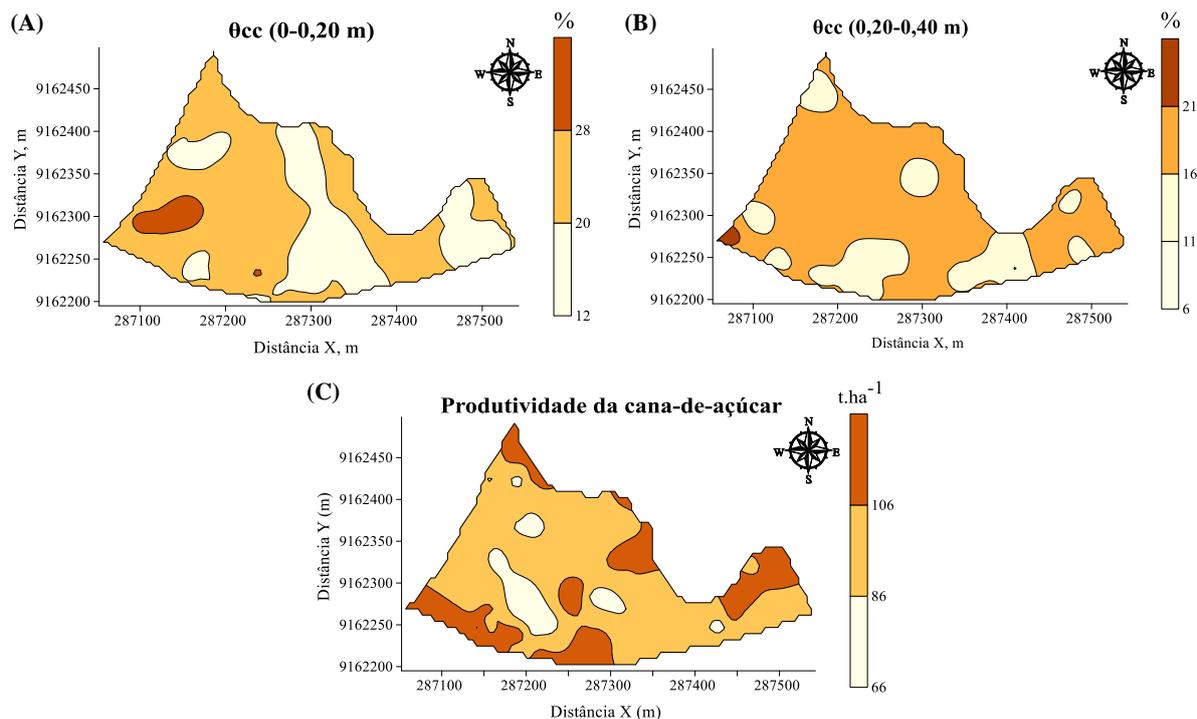


Figura 16. Mapas de isolinhas para a unidade volumétrica (A) (0,00-0,20 m), e (B) (0,20-0,40 m), e produtividade da cana-de-açúcar (C).

Comparando os mapas da macroporosidade (Figuras 15G e 15H), observa-se que a diminuição deste atributo na camada superficial foi menor quando comparada com a camada mais profunda do solo, podendo ser justificado este comportamento pela ação da matéria orgânica (Tabela 1) que age como agente cimentante na agregação das partículas melhorando a macroporosidade do solo (LIMA et al., 2013).

Ainda em relação a porosidade do solo, observando os mapas de isolinhas (Figura 15) verificou-se que a modificação na microporosidade do solo, decorrente da compactação, é menor em relação à variação ocorrida no volume total de poros. Em solos compactados a redução da porosidade total é mais expressiva, enquanto o volume de microporos permanece, praticamente inalterado, ou tende a aumentar, uma vez que a compactação ocasiona redução no tamanho dos poros grandes transformando-os em poros menores (CAMILOTTI et al., 2005).

Nos mapas de variabilidade espacial dos atributos texturais (areia, silte e argila) na camada de 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m (Figuras 17 e 18) pode-se observar que não há comportamento espacial semelhante com a produtividade da cana-de-açúcar (Figuras 16C). Tais resultados corroboraram com os obtidos por Siqueira et al. (2015a), no estudo avaliativo da correlação espacial entre as frações texturais e a produtividade da cana-de-açúcar (safra 2011/2012) na mesma área deste estudo.

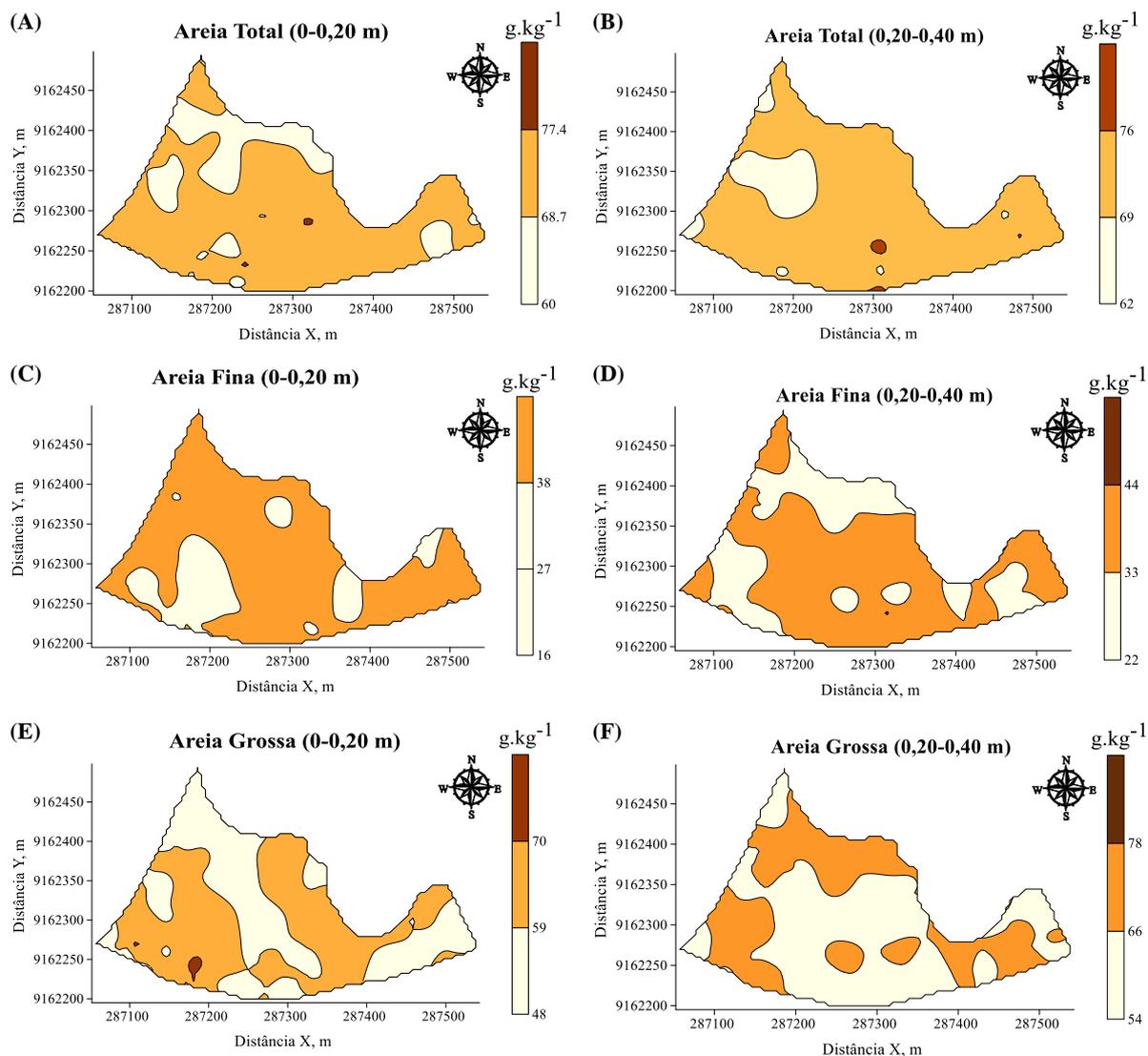


Figura 17. Mapas de isolinhas para a areia total (A) (0,00-0,20 m), e (B) (0,20-0,40 m), areia fina (C) (0,00-0,20 m), e (D) (0,20-0,40 m), e areia grossa (E) (0,00-0,20 m), e (F) (0,20-0,40 m).

Os teores de conteúdo de areia total, areia fina, areia grossa, silte e argila (Figuras 17 e 18) variaram no terreno, embora tenha ocorrido uma predominância dos teores de areia sobre as demais frações granulométricas, podendo ser justificado pela litologia desenvolvida a partir de arenitos e pela eluviação de argila provocada pelo intemperismo característico do solo em estudo (CAMPOS et al., 2007b).

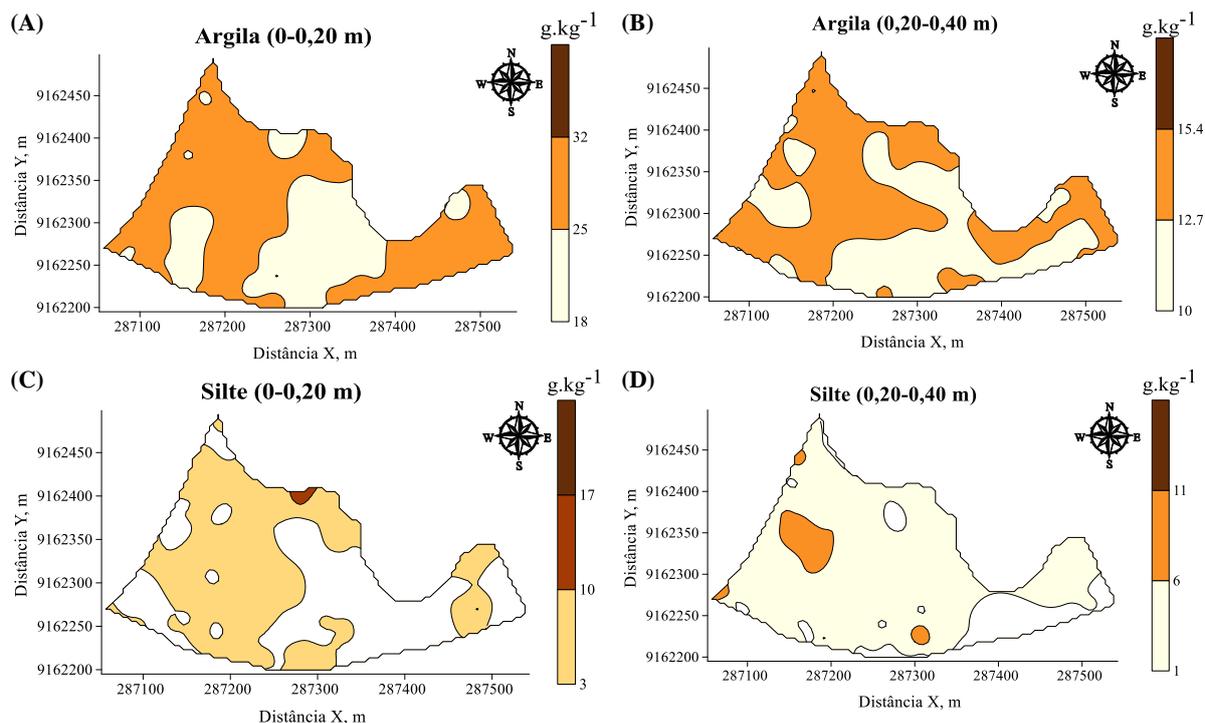


Figura 18. Mapas de isolinhas para a argila (A) (0,00-0,20 m), e (B) (0,20-0,40 m), e silte (C) (0,00-0,20 m), e (D) (0,20-0,40 m).

Observando as distribuições espaciais da areia total e da argila nas duas camadas (Figuras 17A, 17B, 18A e 18B), verifica-se maior ocorrência de argila em áreas com menor teor de areia. Estes resultados foram de acordo com o estudo realizado por Leão et al. (2010), que afirmaram que o fluxo d'água, por ser dependente do relevo, mobiliza facilmente a argila e o silte em áreas preferenciais. Neste sentido, na camada superficial do solo a distribuição espacial da argila (Figura 18A) apresentou leve semelhança com a distribuição da θ_{cc} (Figura 16A). As distribuições de silte ocorreram na área de forma pouco semelhantes da argila nas duas camadas de solo (Figuras 18A e 18B).

Campos et al. (2007b), em estudo para caracterizar a variabilidade espacial de atributos físicos e hídricos em um Espodosolo da Zona da Mata de Pernambuco, também encontraram comportamento espacial inverso para as frações areia total e argila.

Para a fração argila foram observados maiores valores na camada do solo de 0,00-0,20m (Figura 18A), sendo também verificado maior teor de matéria orgânica para esta camada (Tabela 1). A argila é a fração mineral mais ativa para formação de complexos organo-minerais devido à sua carga e à área superficial específica. A acumulação da matéria orgânica, devido à proteção física, ocorre pela positiva influência de agregação na formação de uma barreira entre ela e os microrganismos (CRUZ et al., 2010).

O mapa da densidade do solo na camada superficial apresentou os maiores valores coincidentes com regiões com elevados teores de areia fina (Figuras 15A e 17C). E os menores

valores para a capacidade de campo coincidiram com regiões de menor teor de argila, também na camada superficial do solo (Figuras 16A e 18A).

A correlação linear entre as variáveis analisadas (Tabela 6) demonstrou que os maiores valores de correlação foram encontrados entre a porosidade total e a microporosidade na camada de 0,00-0,20 ($r = 0,94$) e de 0,20-0,40 m ($r = 0,97$).

A Ds na camada de 0,00-0,20 m obteve correlação linear forte negativa ($r = -0,83$) com a porosidade total da mesma camada, conforme classificação proposta por Santos (2007), apresentando tendência similar à observada nos mapas de isolinhas (Figura 15A e 15C). O valor de correlação linear negativo entre estes atributos físicos, indicando uma correlação linear forte inversa, já era esperado, uma vez que, com o aumento da densidade do solo, há uma diminuição na porosidade total. Observando a correlação linear da Ds com a microporosidade (camada 0,00-0,20 m), percebeu-se uma correlação moderada negativa ($r = -0,78$).

Comparando o efeito da densidade do solo em seu espaço poroso, por meio da correlação linear de Pearson, verificou-se que elevados valores de densidade do solo refletem em uma modificação mais significativa na porosidade total se comparada com alterações na microporosidade. CAMILOTTI et al. (2005) estudando os efeitos de sistemas de preparo, no solo com produção de cana-de-açúcar, em propriedades físicas do solo encontraram comportamento semelhante entre a relação da densidade do solo e sua porosidade.

Quando correlacionados os valores de produtividade da cana-de-açúcar com os atributos físicos do solo, foram encontrados valores de correlação baixos ou nulos (Tabela 6), o que também foi observado por Santos 2007. Este resultado pode ser justificado, levando em consideração que além dos atributos físicos do solo, ocorrem outros fatores (atributos químicos, agentes patógenos) que interferem no desenvolvimento e na produtividade da cana-de-açúcar, e que não foram objeto de estudo do trabalho.

Alguns autores ao avaliarem a correlação linear entre a produtividade das culturas e alguns atributos físicos do solo, embora tenham encontrado correlação significativa, os valores de r foram inferiores a 0,225 (SANTOS et al., 2006; MEGDA et al., 2008; ROSA FILHO et al., 2009). Podendo ser considerados baixos em comparação com os valores de r encontrados para atributos químicos. Indicando, provavelmente, que a produtividade das culturas pode ser mais bem explicada por meio da análise dos dados dos atributos químicos do solo.

Siqueira et al. (2015a) ao avaliarem a correlação linear entre a condutividade elétrica do solo, a produtividade da cana-de-açúcar e as frações texturais do solo, na mesma área de estudo, encontraram baixa correlação entre a produtividade da cultura e os atributos físicos e, uma forte correlação linear da produtividade com a condutividade elétrica do solo.

Tabela 6. Matriz de correlação linear entre os atributos físicos do solo e a produtividade da cana-de-açúcar.

	Camada (m)	Ds (Kg.dm ³)		PT (%)		Mi (%)		Ma (%)		θ _{cc} (cm ³ .cm ⁻³)		Areia total (g.kg ⁻¹)		Areia Fina (g.kg ⁻¹)		Areia Grossa (g.kg ⁻¹)		Argila (g.kg ⁻¹)		Silte (g.kg ⁻¹)		Produtividade (t.ha ⁻¹)	
		0,00- 0,20	0,20- 0,40	0,00- 0,20	0,20- 0,40	0,00- 0,20	0,20- 0,40	0,00- 0,20	0,20- 0,40	0,00- 0,20	0,20- 0,40	0,00- 0,20	0,20- 0,40	0,00- 0,20	0,20- 0,40	0,00- 0,20	0,20- 0,40	0,00- 0,20	0,20- 0,40	0,00- 0,20	0,20- 0,40		
Ds (Kg.dm ⁻³)	0,00-0,20	1,00																					
	0,20-0,40	0,41*	1,00																				
PT (%)	0,00-0,20	-0,83*	-0,30*	1,00																			
	0,20-0,40	-0,01	-0,45*	0,08	1,00																		
Mi (%)	0,00-0,20	-0,78*	-0,32*	0,94*	0,03	1,00																	
	0,20-0,40	-0,02	-0,43*	0,11	0,97*	0,05	1,00																
Ma (%)	0,00-0,20	-0,26*	0,02	0,32*	0,16	-0,03	0,17	1,00															
	0,20-0,40	0,10	-0,13	-0,21	-0,10	-0,16	-0,23	-0,16	1,00														
θ _{cc} (cm ³ .cm ⁻³)	0,00-0,20	-0,36*	-0,02	0,43*	-0,26*	0,47*	-0,25	-0,05	-0,02	1,00													
	0,20-0,40	0,15	-0,13	-0,13	0,61*	-0,17	0,62*	0,09	-0,23	0,14	1,00												
Areia total (g.kg ⁻¹)	0,00-0,20	-0,18	-0,18	0,16	0,36*	0,03	0,36*	0,39*	-0,06	-0,18	0,03	1,00											
	0,20-0,40	-0,30*	-0,10	0,20	0,03	0,17	0,01	0,13	0,12	-0,14	-0,32*	0,31*	1,00										
Areia Fina (g.kg ⁻¹)	0,00-0,20	-0,13	-0,27*	0,12	0,21	0,11	0,19	0,05	0,13	-0,06	0,04	0,22	0,28*	1,00									
	0,20-0,40	-0,26*	-0,15	0,24	0,14	0,23	0,16	0,08	-0,13	-0,05	-0,19	0,25*	0,31*	0,40*	1,00								
Areia Grossa (g.kg ⁻¹)	0,00-0,20	-0,02	0,10	0,02	0,08	-0,08	0,10	0,25	-0,15	-0,08	-0,01	0,55*	-0,02	-0,70*	-0,16	1,00							
	0,20-0,40	0,04	0,07	-0,09	-0,12	-0,10	-0,14	0,01	0,21	-0,06	-0,04	-0,03	0,40*	-0,19	-0,75*	0,14	1,00						
Argila (g.kg ⁻¹)	0,00-0,20	0,27*	0,27*	-0,30*	-0,29*	-0,23	-0,28*	-0,23	0,02	0,07	0,11	-0,59*	-0,43*	-0,32*	-0,28*	-0,16	-0,03	1,00					
	0,20-0,40	0,28*	0,19	-0,12	-0,14	-0,08	-0,15	-0,14	0,08	0,13	0,03	-0,39*	-0,68*	-0,33*	-0,29*	0,00	-0,19	0,54*	1,00				
Silte (g.kg ⁻¹)	0,00-0,20	-0,06	-0,06	0,11	-0,13	0,20	-0,14	-0,23	0,05	0,14	-0,15	-0,59*	0,07	0,06	-0,02	-0,49*	0,07	-0,30*	-0,08	1,00			
	0,20-0,40	0,14	-0,04	-0,16	0,10	-0,15	0,13	-0,04	-0,23	0,07	0,40*	-0,05	-0,72*	-0,07	-0,15	0,02	-0,36*	0,08	-0,03	-0,02	1,00		
Produtividade (t.há ⁻¹)		-0,11	0,12	0,12	-0,04	0,10	-0,02	0,10	-0,20	0,20	0,09	0,03	0,14	0,03	0,05	0,00	0,05	-0,19	-0,19	0,15	-0,01	1,00	

* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste de Pearson.

Foram encontrados valores negativos para a correlação linear entre os atributos texturais (Tabela 6), sendo observado que com o aumento do conteúdo de areia na área de estudo, ocorreu uma diminuição dos valores de argila e silte. O valor encontrado na correlação entre a argila e areia total e o silte e areia total foi o mesmo ($r = -0,59$) na camada de 0,00-0,20 m. Na camada de 0,20-0,40 m foi verificada uma correlação inversa mais forte entre a argila e areia total ($r = -0,68$) e o silte e areia total ($r = -0,72$). Siqueira et al. (2015a) também encontraram correlação linear negativa entre os atributos texturais do solo na camada de 0,20-0,40 m.

A umidade do solo apresentou correlação linear positiva com a microporosidade ($r = 0,47$ e $r = 0,62$), para as camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40, respectivamente, e correlação linear negativa com a densidade do solo na camada superficial ($r = -0,36$) (Tabela 6). Estes resultados corroboram com os de Santos et al. (2012), os quais explicam que a diminuição da densidade do solo significa o predomínio de partículas mais finas no solo, com maior capacidade de retenção de água. Ainda foi detectada uma correlação positiva entre macroporosidade e porosidade total, resultados que estão de acordo com Schaffrath et al. (2008).

5. CONCLUSÕES

1. Os valores dos atributos físicos e da produtividade da cana-de-açúcar obedeceram à distribuição Normal de frequências, comprovado pelo teste de Kolmogorov Smirnov ao nível de 5% de significância, com exceção da umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{cc}) que apresentou frequência do tipo Lognormal (Ln) para as duas camadas do solo;

2. A produtividade média da cana-de-açúcar na área de estudo (99,73 t.ha⁻¹) foi superior à produtividade média nacional na safra 2013/2014 (74,10 t.ha⁻¹);

3. Verificou-se, através dos semivariogramas, a partir da análise geoestatística que o modelo esférico foi o que melhor se ajustou ao conjunto de dados;

4. Os atributos texturais apresentaram elevada variabilidade espacial, demonstrando que o esquema de amostragem não foi suficiente para detectar a distribuição espacial das frações granulométricas do solo, com exceção da fração argila na camada de 0,20-0,40 m que teve seus dados ajustados ao modelo exponencial;

5. Para a camada de 0-0,20 m, a maioria das regiões que apresentaram menores valores de Ds e maiores valores de PT, mostraram maior produtividade;

6. A confecção dos mapas de isolinhas possibilitou observar que a faixa mais estreita da área e com maior cota topográfica se apresentou com menor produtividade; maiores valores de macroporos e menores valores de umidade.

7. A produtividade da cana-de-açúcar não apresentou correlação linear com os atributos físicos do solo, nas profundidades estudadas, comprovado pelo teste de Pearson ao nível de 5% de significância.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, S.L.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v.28, p.519-531, 2004.

ALMEIDA, B.G.; DONAGEMMA, G.K.; RUIZ, H.A.; BRAIDA, J.A.; VIANA, J.H.M.; REICHERT, J.M.M.; OLIVEIRA, L.B.; CEDDIA, M.B.; WADT, P.S.; FERNANDES, R.B. A.; PASSOS, R.R.; DECHEN, S.C.F.; KLEIN, V.A.; TEIXEIRA, W.G. Padronização de métodos para análise granulométrica no Brasil. ISSN 1517-5685, Rio de Janeiro, 2012.

ALMEIDA, C.F.P.; RIBEIRO JÚNIOR, P.J. Estimação da distribuição espacial de retenção de água em um solo utilizando krigagem indicatriz. Curitiba, UFPR, 1996, 38p.

ALVES, S.M.; ALCÂNTARA, G.R.; REIS, E.F.; QUEIROZ, D.M.; VALENTE, D.S.M. Definição de zonas de manejo a partir de mapas de condutividade elétrica e matéria orgânica. **Bioscience Journal**, v.29, p.104-114, 2013.

AMARO FILHO, J.; NEGREIROS, R.F.D.; ASSIS JÚNIOR, R.N. & MOTA, J.C.A. Amostragem e variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho em Mossoró, RN. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.415-422, 2007.

ANDRADE, A.R.S.; GUERRINI, I.A.; GARCIA, C.J.B.; KATEZ, I.; GUERRA, H.O.C.; Variabilidade espacial da densidade do solo sob manejo da irrigação. **Ciência Agrotécnica**, v. 29, p.322-329, 2005.

ANDRIOTTI, J.L.S. Fundamentos de estatística e geoestatística. Editora Unisinos, 2003, 165p.

AQUINO, R.A. de; CAMPOS, M.C.C.; MARQUES JÚNIOR, J.; OLIVEIRA, I.M. de; MANTOVANELI, B.C. & SOARES, M.D.R. Geoestatística na avaliação dos atributos físicos em latossolo sob floresta nativa e pastagem na região de Manicoré, Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.397-406, 2014.

ARAUJO, M.A.; TORMENA, C.A. & SILVA, A.P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.337-345, 2004.

ASSIS, R.L.; LANÇAS, K.P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo Vermelho distroférico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.515-522, 2005.

BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. Soil physics. New York: J. Wiley, 1972. 498 p.

BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J.A.; LEITE, D.; AMARAL, A.J.; JUNIOR, W.A.Z. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas as do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 155-163, 2004.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SOUZA, Z.M.; ANDRIOLI, I.; ROQUE, C.G. Retenção de água em dois tipos de latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.829-834, 2012.

BONINI, A.K.; SECCO, D.; SANTOS, R.F.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Atributos físico-hídricos e produtividade de trigo em um Latossolo sob estados de compactação. **Ciência Rural**, v.41, p.1543-1548, 2011.

BOTTEGA, E.L.; BOTTEGA, S.P.; SILVA, S.A.; QUEIROZ, D.M.; SOUZA, C.M.A.; RAFULL, L.Z.L. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em um Latossolo Vermelho distroférico. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.6, p.331-336, 2011.

BOTTEGA, E.L.; QUEIROZ, D.M.; PINTO, F.A.C.; SOUZA, C.M.A. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agronômica**, v.44, p.1-9, 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica. Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco (Boletim Técnico, 26, Série Pedologia, 14). Convênio de mapeamento de solos MA/DNPEA-SUDENE/DRN convênio MA/ CONTAP/USAID/ETA. Recife, 1972.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Escritório de Pesquisas e Experimentação. Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo. Levantamento detalhado dos solos da Estação Experimental de Itapirema (Boletim Técnico, 12). Rio de Janeiro, 1969. 84 p.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. Elementos da natureza e propriedades dos solos. 3ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 686p.

BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; VEIGA, M. da. & REINERT, D. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.605-614, 2006.

BRITO, L.F.; SOUZA, Z.M.; MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; CAZETTA, D.A.; CALZAVARA, S.A.; OLIVEIRA, L. Influência de formas do relevo em atributos físicos de um latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, v.36, p.1749-1755, 2006.

BRUAND, A.; TESSIER, D. Water retention properties of the clay in soils developed on clayey sediments: significance of parent material and soil history. **European Journal of Soil Science**, v. 51, p. 679-688, 2000.

BUCKMAN, H.D.; BRADY, N.C. Natureza e propriedades dos solos. 2ª ed. São Paulo: F. Bastos, 1989. 594 p.

BUURMAN, P.; JONGMANS, A.G. Podzolization and Soil Organic Matter Dynamics. **Geoderma**, v.125, p.71-83, 2005.

CAJAZEIRA, J.P.; ASSIS JÚNIOR, R.N. Variabilidade espacial das frações primárias e agregados de um argissolo no Estado do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, v.42, p.258-267, 2011.

CALDEIRA-PIRES, A.; VILELA, F.S.; LUZ, S.M.; PALMA-ROJAS, S.; RODRIGUES, T. O.; SILVÉRIO, V.C.; ALVES, A.M. Sustainability of the Biorefinery Industry for Fuel Production. **Energies**, v.6, p.329-350, 2013.

CAMARGO, E.C.G. Desenvolvimento, implementação e teste de procedimentos geoestatísticos (krigagem) no sistema de processamento de informações georreferenciadas (Spring). São José dos Campos, 1997, 135 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

CAMARGO, L.A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. & HORVAT, R.A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas do relevo. II - Correlação espacial entre mineralogia e agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.2279-2288, 2008.

CAMARGO, O.A., MONIZ, A.C., JORGE, J.A., & VALADARES, J.M.A.S. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas (Boletim técnico, 106). Campinas: Instituto Agronômico. 94 p, 1986.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Fieldscale variability of soil properties en Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.1501-1511, 1994.

CAMILOTTI, F.; ANDRIOLI, I.; DIAS, F.L.F.; CASAGRANDE, A.A.; SILVA, A.R. da; MUTTON, M. A.; CENTURION, J. F. Efeito prolongado de sistemas de preparo do solo com e sem cultivo de soqueira de cana crua em algumas propriedades físicas do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 25, p. 189-198, 2005.

CAMPOS, M.C.C.; FERRAZ, F.B.; FREITAS, E.V.S.; SOUZA, Z.M. Dependência espacial de atributos físicos e hídricos de um Espodossolo da zona da Mata de Pernambuco. **Revista de Biologia e Ciência da Terra**, v.7, p.84-91, 2007a.

CAMPOS, M.C.C.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; MONTANARI, R.; SIQUEIRA, D.S. Variabilidade espacial da textura de solos de diferentes materiais de origem em Pereira Barreto, SP. **Revista Ciência Agronômica**, v.38, p.149-157, 2007b.

CARSEL, R.F. & PARRISH, R.S. Developing joint probability distribution of soil water retention characteristics. **Water Res. Res.**, v.24, p.755-769, 1988.

CARVALHO, L.A.; MEURER, I.; SILVA JUNIOR, C.A.; CENTURION, J.F. Spatial variability of soil physical properties in two management systems in sugarcane crop. **Engenharia Agrícola**, v.32, p.60-68, 2012.

CARVALHO, M.P.; TAKEDA, E.Y.; FREDDI, O.S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.695-703, 2003.

CARVALHO, T.M. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas de um latossolo vermelho-amarelo através da geoestatística. Lavras, 1991, 98 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura de Lavras.

CARVALHO, V.S.; RIBEIRO, M.R.; SOUZA JÚNIOR, V.S.; BRILHANTE, S.A. Caracterização de espodossolos dos estados da Paraíba e do Pernambuco, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.1454-1463, 2013.

CASAGRANDE, A.A.; VASCONCELOS, A.C.M. Fisiologia da parte aérea. In: Dinardo-Miranda, L.L.; Vasconcelos, A.C.M.; Andrade, L.M.G. Cana-de-açúcar. Campinas: Instituto Agrônomo, p. 57-78, 2008.

CENTURION, J.F. & DEMATTÊ, J.L.I. Efeito de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um solo sob cerrado cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.9, p.263-266, 1985.

CICHOTA, R. & JONG VAN LIER, Q. Análise da variabilidade espacial de pontos amostrais da curva de retenção de água no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.585-596, 2004.

CLARK, I. Practical geostatistics. London, Applied Science. Publishers, 1979.

CONAB-Companhia Brasileira de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira: Cana-de-açúcar, safra 2015/2016. Primeiro Levantamento, v.2, n.1, p.1-28, Brasília, 2015a. Consultado em 29 de julho de 2015, de http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_04_13_09_39_02_boletim_cana_p_ortugues_-_1o_lev_-_15-16.pdf

CONAB-Companhia Brasileira de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira: Cana-de-açúcar, safra 2014/2015. Quarto Levantamento, v.1, n.4, p.1-29, Brasília, 2015b. Consultado em 5 de Agosto de 2015, de http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_04_13_08_45_51_boletim_cana_p_ortugues_-_4o_lev_-_14-15.pdf

CONAB-Companhia Brasileira de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira: Cana-de-açúcar, safra 2013/2014. Quarto Levantamento, v.1, n.4, p.1-30, Brasília, 2014a. Consultado em 3 de Outubro de 2016, de http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_04_13_08_45_51_boletim_cana_p_ortugues_-_4o_lev_-_13-14.pdf

CORRÊA, M.M.; MOREAL, A.M.; KER, J.C.; CARVALHO FILHO, A. Avaliação de critérios de classificação de Espodosolos do Pantanal Matogrossense e de Tabuleiros Costeiros relacionados ao Grupo Barreiras. CD-ROOM **Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**. Brasília, 1999.

CORWIN, D.L.; LESCH, S.M. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity I. Survey protocols. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.46, p.103–133, 2005.

COSTA, M.J.; ROSA JÚNIOR, E.J.; ROSA, Y.B.C.J.; SOUZA, L.C.F. de; ROSA, C.B.J. Atributos químicos e físicos de um latossolo sendo influenciados pelo manejo do solo e efeito da gessagem. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.29, p.701-708, 2007.

COSTA, T.C.C. Avaliação de estratégias para classificação de imagens orbitais em mapeamento de uso e cobertura da terra. Viçosa, 1999, 185 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa.

COSTA, M.C.G. Distribuição e crescimento radicular em soqueiras de cana-de-açúcar: dois cultivares em solos com características distintas. Piracicaba, 2005. 88p. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.

COSTA, W.A.; OLIVEIRA, C.A.S; KATO, E. Modelos de ajuste e métodos para a determinação da curva de retenção de água de um latossolo-vermelho-amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.515-523, 2008.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. Geologia e recursos minerais do Estado de Pernambuco. Recife. Escala 1:500.000 CPRM/DIEDIG/DEPAT, 2001. 198p.

CRESSIE, N. Statistics for spacial data. New York, John Wiley, 1993. 900 p.

CRUZ, J.S.; ASSIS JUNIOR, R.N.; MATIAS, S.S.R.; CAMACHO-TAMAYO, J.H.; TAVARES, R.C. Análise espacial de atributos físicos e matéria orgânica em Argissolo Vermelho amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Ciência Agrotécnica**, v.34, p.271-278, 2010.

DAM, R.F.; MEHDI, B.B.; BURGESS, M.S.E.; MADRAMOOTOO, C.A.; MEHUYS, G.R.; CALLUM, I.R. Soil bulk density and crop yield under eleven consecutive years of corn with different tillage and residue practices in a sandy loam soil in central Canada. **Soil and Tillage Research**, v.84, p.41-53, 2005.

DANTAS, J.; FIGUEIREDO, J.L.C.; FARIAS, C.H.A.; AZEVEDO, H.M.; & AZEVEDO, C.A.V. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, p.283-288, 2006.

DE WIJS, H.J. Statistics of ore distribution, part I. **Geologie en Mijnbouw**, v.13, p.365–375, 1951.

DE WIJS, H.J. Statistics of ore distribution, part II. **Geologie en Mijnbouw**, v.15, p.12-24, 1953.

DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D. R.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S.; LOPES, P. P. Programa para confecção da curva de retenção de água no solo, modelo van Genuchten. Soil water retention curve, SWRC (version 3,00 beta). Piracicaba: USP, 2001.

EGUCHI, E.S.; SILVA, E.L.; OLIVEIRA, M.S. Variabilidade espacial da textura e da densidade de partículas em um solo aluvial no município de Lavras, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, p.242-246, 2002.

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

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, 353 p, 2013.

EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro. 2ª ed. revisada. Atual. Embrapa solo, 230 p. 2011.

FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; BEUTLER, A.N.; ARATANI, R.G.; LEONEL, C.L. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.627-636, 2007.

GAVA, G.J.C.; SILVA, M.A.; SILVA, R.C.; JERONIMO, E.M.; CRUZ, J.C.S.; KÖLLN, O.T. Produtividade de três cultivares de cana-de-açúcar sob manejos de sequeiro e irrigado por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, p.250–255, 2011.

GENUCHTEN, M.T. van. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.892-898, 1980.

GHELLER, A.C.A. Manual de método alternativo para medição da produção de cana-de-açúcar. Araras: UFSCar, CCA, DBV, 7 p.1999.

GILBERT, R.A.; SHINE JUNIOR, J.M.; MILLER, J.D.; RICE, R.W.; RAINBOLT, C.R. The effect of genotype, environment and time of harvest on sugarcane yields in Florida, USA. **Field Crops Research**, v.95, p.156-170, 2006.

Golden Software. Surfer 11.0 - user's guide. New York: Golden Software, 2002.

GONÇALVES, A.C.A.; FOLEGATTI, M.V. & MATA, J.D.V. Análise exploratória e geoestatística da variabilidade de propriedades físicas de um Argissolo Vermelho. **Acta Science**, v.23, p.1149-1157, 2011.

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

GUIMARÃES, E.C. Geoestatística básica e aplicada. Universidade Federal de Uberlândia: núcleo de estudos estatísticos e biométricos. Uberlândia-MG, 2004.

- HILLEL, D. Fundamentals of soil physics. New York: Academic press, 1980. 213 p.
- HOAGLIN, D.C.; MOSTELLER, F.; TUKEY, J.W. Análise exploratória de dados: Técnicas robustas. Lisboa: Edições Salamandra. 1992. 446p.
- ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. An Introduction to Applied Geostatistics, Oxford University Press, 561p. 1989.
- JADOSKI, C.J.; TOPPA, B.E.V.; JULIANETTI, A.; HULSBOF, T.; ONO, E.O.; RODRIGUES, J.D. Physiology development in the vegetative stage of sugarcane. **Pesquisa aplicada e agrotecnologia**, v. 3, p.224-233, 2010.
- JIMENEZ, R.L.; GONÇALVES, W.G.; ARAÚJO FILHO, J.V.; ASSIS, R.L.; PIRES, F.R.; SILVA, G.P. Crescimento de plantas de cobertura sob diferentes níveis de compactação em um Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, p. 116–121, 2008.
- JOHANN, J.A.; OPAZO, M.A.U.; SOUZA, E.G. de. & ROCHA, J.V. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e da produtividade de um Latossolo Bruno distrófico da região de Cascavel, PR. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.8, p. 212-219, 2004.
- JOURNAL A.G., HUIJBREGTS C.J. Mining Geostatistics. London: Academic Press. 600p. 1978.
- KASTANEK, F.J.; NIELSEN, D.R. Description of soil water characteristics using cubic spline interpolation. **Soil Science Society of America Journal**, v.65, p.279-283, 2001.
- KIEHL, E.J. Manual de edafologia. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 262p.
- KLEIN, V.A.; BASSEGIO, M.; MADALOSSO, T.; MARCOLIN, C.D. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro. **Ciência Rural**, v.40, p. 1550-1556, 2010.
- KLEIN, V.A. Densidade relativa - Um indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho. **Revista Ciência Agronômica**, v.5, p.26-32, 2006.
- KLEIN, V.A., Física do Solo. Passo Fundo-RS: Editora da Universidade de Passo Fundo, 2012. 212p.
- KLEIN, V.A. Propriedades do solo e manejo da água em ambientes protegidos com cultivo de morangueiro e figueira. Passo Fundo-RS: Editora da Universidade de Passo Fundo, 2005. 61 p.

KRIGE, D.G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa*. p.119-139, 1951.

LANDIM, P.M.B. Sobre Geoestatística e mapas. *Terra e didática*. p.19-33, 2006.

LEÃO, A.B.; SOUZA, Z.M.; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de fósforo em solo do perímetro irrigado. **Revista Ciência Agronômica**, v.38, p.1-6, 2007.

LEÃO, M.G.A.; MARQUES JUNIOR, J.; SOUZA, Z.M.; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial da textura de um Latossolo sob cultivo de citros. **Ciência e Agrotecnologia**, v.34, p.121-131, 2010.

LEÃO, M.G.A.; MARQUES JUNIOR, J.; SOUZA, Z.M.; SIQUEIRA, D.; PEREIRA, G.T. Terrain forms and spatial variability of soil properties in an area cultivated with citrus. **Engenharia Agrícola**, v.31, p.644-651, 2011.

LIBARDI, P.L. Dinâmica da água no solo. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005, 335p.

LIBARDI, P.L. Dinâmica da água no solo. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2012. 346 p.

LIMA, J.A.G.; MENDES, A.M.S.; DUDA, G.P.; FERREIRA, C.V. Variabilidade espacial de características físico-hídricas de um Cambissolo cultivado com mamão no semi-árido do RN. **Revista Caatinga**, v.19, p.192-199, 2006.

LIMA, R.P.; LEÓN, M. J. de; SILVA, A. Compactação do solo de diferentes classes texturais em áreas de produção de cana-de-açúcar. **Revista Ceres**, v. 60, p.16-20, 2013.

MACEDO, I.C.; SEABRA, J.E.; SILVA, J.E. Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v.32, p.582-595, 2008.

MACÊDO, G.A.R.; COSTA, E.L.; VIANA, M.C.M.; FERREIRA, J.J.; PIRES, J.F.; FREIRE, F. M. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, p.599–603, 2012.

MACHADO, R.V. Variabilidade espacial de atributos físico hídricos em uma hidro sequência de solos de bem a mal drenados. Lavras, 1994, 88 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura de Lavras.

MAGRO, F.J.; TAKAO, G.; CAMARGO, P.E.; TAKAMATSU, S.Y. Biometria em cana-de-açúcar. Produção de Cana-de-Açúcar. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2011, 18p.

MANHÃES, C.M.C.; GARCIA, R.F.; FRANCELINO, F.M.A.; FRANCELINO, H.O.; COELHO, F.C. Fatores que afetam a brotação e o perfilhamento da cana-de-açúcar. **Vértices**, v.17, p.163-181, 2015.

MARTINS, M.V.; PASSOS, E.; CARVALHO, M.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R. Correlação linear e espacial entre a produtividade do feijoeiro e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico de Selvíria, Estado de Mato Grosso do Sul. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 31, p.147-154, 2009.

MEGDA, M.M.; CARVALHO, M.P.; VIEIRA, M. X.; ANDREOTTI, M.; PEREIRA, E. C. Correlação linear e espacial entre a produtividade de feijão e a porosidade de um Latossolo Vermelho de Selvíria (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.781-788, 2008.

MENDES, A.M.S.; FONTES, R.L.F.; OLIVEIRA, M. Variabilidade espacial da textura de dois solos do deserto salino, no Estado do Rio Grande do Norte. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 39, p.19-27, 2008.

MESQUITA, M. da G.B. de F.; MORAES, S.O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, v. 34, p.205-215, 2004.

MION, L.R.; NASCIMENTO, E.M.S.; SALES, F.A.L.; SILVA, S.F.; DUARTE, J.M.L.; SOUZA, B.M. Variabilidade espacial da porosidade total, umidade e resistência do solo a penetração de um Argissolo amarelo. **Ciências Agrárias**, v.36, p.2057-2066, 2012.

MONTANARI, R. CARVALHO, M.P.; ANDREOTTI, M.; DALCHIAVON, F.C.; LOVERA, L.H.; HONORATO, M.A.O. Aspectos da produtividade do feijão correlacionados com atributos físicos do solo sob elevado nível tecnológico de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.1811-1822, 2010.

MONTANHA, G.K. Agricultura de precisão reduz perdas na lavoura de cana. **Revista Campo e Negócio**, v.9, p.59-73, 2011.

OLIVEIRA, I.A.; CAMPOS, M.C.C.; SOARES, M.D.R.; AQUINO, R.E.; MARQUES JÚNIOR, J.; NASCIMENTO, E.P. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Cambissolo háplico, sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p.1103-1112, 2013.

OLIVEIRA, J.B. de. Pedologia Aplicada. 2ª ed. Piracicaba: Fealq: 2005. 574 p.

OLIVEIRA, L.B. de. Determinação da macroporosidade e microporosidade pela “mesa de tensão” em amostras de solo com estrutura indeformada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.3, p.197-200, 1968.

ORTIZ, J.L. Emprego do geoprocessamento no estudo da relação entre potencial produtivo de um povoamento de eucalipto e atributos do solo e do relevo. Piracicaba, 2003, 150 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP

PEREIRA, S.R. Solos afetados por sais. In: Cavalcanti, F.V. A. (Coord.). **Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco**. 2ª ed. Recife: IPA, p.76-82, 1998.

PIRES, L.F.; ROSA, J.A.; TIMM, L.C. Comparação de métodos de medida da densidade do solo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.33, p.161-170, 2011.

PREVEDELLO, C.L. Física do solo com problemas resolvidos. Curitiba: SAEAFS, 1996. 446 p.

PREVEDELLO, B.M.S. Variabilidade espacial de parâmetros de solo e planta. Piracicaba, 1987, 187 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

PMGCA - PPROGRAMA DE MELHORAMENTO GENÉTICO DA CANA-DE-AÇÚCAR - catálogo de variedades. Consultado em 02 de Agosto de 2016. https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/VarietadesRB_2008.

RAMESH, P. Effect of different levels of drought during the formative phase on growth parameters and its relationship with dry matter accumulation in sugarcane. **Journal Agronomy and Crop Science**, v.185, p.83-89, 2000.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações. Barueri: Manole, 2008, 335 p.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. Solo, planta e atmosfera: conceito, processos e aplicações. Barueri: Manole, 2004, 478 p.

REICHERT, J.M.; KAISER, D.R.; REINERT, D.J.; RIQUELME, U.F.B. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, p.310-319, 2009.

- RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S.B.; CORRÊA, S.A. Pedologia: base para distinção de ambientes. 4ª ed. Viçosa: NEPUT, 2002, 338 p.
- RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ V.V.H. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª aproximação. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359p.
- RIBEIRO, K.D.; MENEZES, S.M.; MESQUITA, M.G.B.F.; SAMPAIO, F. M. T. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de seis classes de solos da região de Lavras-MG. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, p. 1167-1175, 2007.
- RIBEIRO, M.R. OLIVEIRA, L.B. ARAÚJO FILHO, J.C. Caracterização morfológica do solo. In: Ker, J. C. et al. Eds. Pedologia: Fundamentos. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012. p.47-79.
- RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O.R.; LLANILLO, R.F.; FERREIRA, R. Compactação de solo: Causas e efeitos. **Ciências Agrárias**, v. 26, p. 321-344, 2005.
- RIGATO, M.A.; DEDECEK, R.A.; MATTOS, J. L.M. de. Influência dos atributos do solo sobre a produtividade de *Pinus taeda*. **Revista Árvore**, v.29, p.701-709, 2005.
- ROCHA, G.C.; LIBARDI, P.L.; CARVALHO, L.A. & CRUZ, A.C.R. Estabilidade temporal da distribuição espacial da armazenagem de água em um solo cultivado com citrus. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.41-50, 2005.
- ROBERTSON, G.P. GS+ geostatistics for the environmental sciences: GS+ user's guide. Plainwell: Gamma Design Software, 152p, 1998.
- ROSA FILHO, G.; CARVALHO, M.P.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R.; BINOTTI, F.F.S.; GIOIA, M.T. Variabilidade da produtividade da soja em função de atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.283-293, 2009.
- ROSSATO, L.; TOMASELLA, J. & ALVALÁ, R.C.S. Avaliação da umidade do solo no Brasil durante o episódio El Nino (1982/83). **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.13, p.143-153, 2005.
- SALVIANO, A.A.C. Variabilidade de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* em solo degradado do município de Piracicaba-SP. Piracicaba, 1996. 91 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"- USP.
- SANTOS, C.M.A. Estatística descritiva: manual de autoaprendizagem. Lisboa: Edições Sílabo. 261 p., 2007.

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

SANTOS, K.S.; MONTENEGRO, A. A. A.; ALMEIDA, B.G.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; ANDRADE, T.S.; FONTES JÚNIOR, R.V.P. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v.16, p.828–835, 2012.

SANTOS, M.L.; CARVALHO, M.P.; REPASSI, R.M.A.; MALLER, C.T.M.; MALLER, A.; MATOS, F. A. M. Correlação linear e espacial entre produtividade de milho (*Zea mays* L.) e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto do Cerrado Brasileiro. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.28, p.313-321, 2006.

SCHAFFFRATH, V.R.; TORMENA, C.A.; GONÇALVES, A.C.A.; FIDALSKI, J. Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1369-1377, 2008.

SERAFIM, L.G.F. STOLF, R.; SILVA, J.R.; SILVA, L.C.F.; MANIERO, M.A. Influência do plantio mecanizado no índice de brotação da cana-de-açúcar. In: Congresso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola. Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Londrina, 2012.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; CASTRO, M.B.; OLIVEIRA, L.C.; COSTA, K.A.P. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: I - modelagem e quantificação da compactação adicional após as operações de colheita. **Engenharia Agrícola**, v. 30, p.404-413, 2012.

SILVA, J.S.; MONTENEGRO, A.A.A.; SILVA, E.F.F.; ANDRADE, C.W.L.; SILVA, J.R.L. Distribuição espacial da condutividade elétrica e matéria orgânica em Neossolo Flúvico. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v.6, p.764-776, 2013.

SILVA NETO, S.P.; SANTOS, A.C.; LEITE, R.L.L.; DIM, V.P.; NEVES NETO, D.N. & SILVA, J.E.C. Variação espacial do teor de matéria orgânica do solo e produção de gramínea em pastagens de capim-marandu. **Biosci**, v.28, p.41-53, 2012.

SILVA, S.A.; LIMA, J.S.S.; SOUZA, G.S.; OLIVEIRA, R.B.; SILVA, A.F. Variabilidade espacial do fósforo e das frações granulométricas de um Latossolo Vermelho Amarelo. **Revista Ciência Agronômica**, v.41, p.1-8, 2010.

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

SILVA, A.P. & KAY, B.D. Estimating the least limiting water range of soil from properties and management. **Soil Science Soc.** v.61, p.877-883, 1997.

SIQUEIRA, G.M.; SILVA, E.F.F.; DAFONTE, J.D. Distribuição espacial da condutividade elétrica do solo medida por indução eletromagnética e da produtividade de cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v.74, p.215-223, 2015a.

SIQUEIRA, G.M.; SILVA, J.S.; BEZERRA, J. M.; SILVA, E. F. F.; DAFONTE, J. D.; MELO, R. F. Estacionariedade do conteúdo de água de um Espodosolo Humilúvico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, p.439-448, 2015b.

SIQUEIRA, G.M. Variabilidade de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos. Campinas, 2006, 163 p. Dissertação (Mestrado em agricultura tropical e subtropical) - Instituto Agrônômico.

SIQUEIRA, G.M.; VIEIRA, S.R.; CEDDIA, M.B. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos. **Bragantia**, v.67, p.203-211, 2008.

SIQUEIRA, G.M.; VIEIRA, S.R.; DECHEN, S.C.F. Variabilidade espacial da densidade e da porosidade de um Latossolo Vermelho eutroférico sob semeadura direta por vinte anos. **Bragantia**, v.68, p.751-759, 2009.

SOARES, J.L.N.; ESPINDOLA, C.R.; FOLONI, L.L. Alteração física e morfológica em solos cultivados com citros e cana-de-açúcar, sob sistema tradicional de manejo. **Ciência Rural**, v.35, p.353-359, 2005.

SOARES, M.D.R.; CAMPOS, M.C.C.; SOUZA, Z.M. de.; BRITO, W.B.M.; FRANCISCON, U.; CASTIONI, G.A.F. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo em área de Terra Preta Arqueológica sob pastagem em Manicoré, AM. *Revista de Ciências Agrárias*, v.58, p.434-441, 2015.

SOUZA, J.M.; BONOMO, R.; PIRES, F.R.; BONOMO, D.Z. Curva de retenção de água e condutividade hidráulica do solo, em lavoura de café conilon submetida à subsolagem. **Coffee Science**, v.9, p.226-236, 2014.

SOUZA, Z.M. de.; ALVES, M.C. Propriedades físicas e teor de matéria orgânica em um Latossolo Vermelho de cerrado sob diferentes usos e manejo. *Acta Scientiarum*, v.25, p.27-34, 2003.

SOUZA, Z.M. de.; CAMPOS, M.C.C.; CAVALCANTE, Í.H.L.; MARQUES JÚNIOR, J.; CESARIN, L.G. & SOUZA, S.R. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e teor de água do solo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, v.36, p.128-134, 2006.

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

SOUZA, Z.M. de.; MARQUES JÚNIOR, J. & PEREIRA, G.T. Geoestatística e atributos do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, v.40, p.48-56, 2009.

SOUZA, Z.M. de.; MARQUES JÚNIOR, J. & PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.937-944, 2004.

SPERA, S.T.; SANTOS, H.P.; FONTANELI, R.S.; TOMM, G.O. Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo e na produtividade. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v.28, p.533-542, 2004.

StatSoft - Statistica (Data Analysis Software System), versão 7.0, (www.statsoft.com), 2004.

STEVENS, F.; BOGAERT, P.; VAN WESEMAEL, B. Spatial filtering of a legacy dataset to characterize relationships between soil organic carbon and soil texture. **Geoderma**, v.237-238, p.224-236, 2015.

TAVARES, U.E; ROLIM, M.M.; PEDROSA, E.M.R.; MONTENEGRO, A.A.M.; MAGALHÃES, A.G.; BARRETO, M.T.L. Variabilidade especial de atributos físicos e mecânicos de um Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, p.1206–1214, 2012.

TORMENA, C.A.; FRIEDRICH, R.; PINTRO, J.C.; COSTA, A.C.S.; & FIDALSKI, J. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num Latossolo Vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p.1023-1031, 2004.

TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, v.38, p.45-94, 1985.

VASCONCELOS, A.C.M. & DINARDOMIRANDA L.L. Dinâmica do Desenvolvimento Radicular da Cana-de-Açúcar e Implicações no Controle de Nematóides. **Adonis**, p. 7-34, 2011.

- VIANA, E.T.; BATISTA, M.A.; TORMENA, C.A.; COSTA, A.C.S.; INOUE, T.T. Atributos físicos e carbono orgânico em Latossolo vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.2105-2114, 2011.
- VIEIRA, M.L. Propriedades físico-hídrico-mecânicas do solo e rendimento de milho submetido a diferentes sistemas de manejo. Passo Fundo, 2006, 115 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da UPF.
- VIEIRA, S.R. Curso de atualização em conservação do solo - Uso de geoestatística. Campinas, IAC, v.1 e 2, 1995.
- VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudo de variabilidade espacial do solo: In Novais, R.F.; Alvarez V., V.H.; Schaefer, C.E.G.R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, p.1-55, 2000.
- VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v.51, p.1-75, 1983.
- VIEIRA, S.R.; LOMBARDI NETO, F. Variabilidade espacial de potencial de erosão das chuvas do Estado de São Paulo. **Bragantia**, v.54, p.405-412, 1995.
- VILAS-BOAS, P.R.; ROMANO, R.A.; FRANCO, M.A.M.; FERREIRA, E.C.; FERREIRA, E.J.; CRESTANA, S.; MILORI, D.M.B.P. Laser-induced breakdown spectroscopy to determine soil texture: A fast analytical technique. **Geoderma**, v.263, p.195-202, 2016.
- ZONTA, J.H.; BRANDÃO, Z.N.; MEDEIROS, J.C.; SANA, R.S.; SOFIATTI, V. Variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada com algodoeiro no Cerrado do Brasil. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, p.595-602, 2014.
- 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.
- WEIRICH NETO, P.H. Um estudo da variabilidade espacial do conteúdo de areia do solo, utilizando diferentes métodos de interpolação. **Ciências Agrárias e Engenharias**, v.12, p.41-49, 2006.
- YAMAMOTO, J.K.; LANDIM, P.M.B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. 1ª ed. São Paulo: Oficina de Textos. 215p., 2013.