GUILHERME ADALBERTO FERREIRA CASTIONI

VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO E PRODUTIVIDADE DO FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DA GEOFORMA E IRRIGAÇÃO POR PIVÔ CENTRAL

CAMPINAS

2013

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

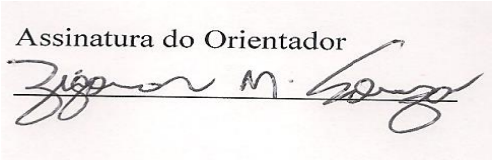
GUILHERME ADALBERTO FERREIRA CASTIONI

VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO E PRODUTIVIDADE DO FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DA GEOFORMA E IRRIGAÇÃO POR PIVÔ CENTRAL

Orientador: Prof. Dr. Zigomar Menezes de Souza
Co-Orientador: Prof. Dr. Reginaldo Barbosa da Silva

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, na área de concentração de água e solo.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO GUILHERME ADALBERTO FERREIRA CASTIONI E ORIENTADO PELO PROF. DR. Zigomar Menezes de Souza



CAMPINAS
2013

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

C278v

Castioni, Guilherme Adalberto Ferreira, 1985-
Variabilidade espacial de atributos do solo e produtividade do feijoeiro em função da geoforma da paisagem e da irrigação por pivô central / Guilherme Adalberto Ferreira Castioni. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: Zigomar Menezes de Souza.
Coorientador: Reginaldo Barbosa da Silva.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Argila. 2. Raízes - Cultivo. 3. Geologia - Métodos estatísticos. 4. Geoestatistica. 5. Clay. I. Souza, Zigomar Menezes,1970-. II. Silva, Reginaldo Barbosa da. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em inglês: Spatial variability of soil physical properties and grain yield depending on geoforma landscape and irrigation center pivot
Palavras-chave em inglês:
Clay
Roots - Growing
Geology - Statistical methods
Geostatistics
Área de concentração: Água e Solo
Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola
Banca examinadora:
Zigomar Menezes de Souza [Orientador]
Edson Eiji Matsura
Rafael Montanari
Data de defesa: 14-02-2013
Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Guilherme Adalberto Ferreira Castioni**, aprovado pela Comissão Julgadora em 14 de fevereiro de 2013, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

FEAGRI

Prof. Dr. Zigomar Menezes de Souza – Presidente e Orientador
Feagri/Unicamp

Prof. Dr. Rafael Montanari - Membro Titular
FEIS/Unesp

Faculdade de Engenharia Agrícola Unicamp

Prof. Dr. Edson Eiji Matsura – Membro Titular
Feagri/Unicamp

DEDICATÓRIA

"O homem sábio"

Serenidade é conquista que se consegue com esforço pessoal e passo a passo.
Pequenos desafios que são superados; irritação que se faz controlada, desajustes emocionais corrigidos; vontade bem direcionada; ambição freada, são experiências para aquisição da serenidade.
Um Espírito sereno, já se encontrou consigo próprio, sabendo o que, exatamente deseja da vida.
A serenidade harmoniza, exteriorizando-se de forma agradável para os circundantes.
O homem sereno já venceu grande parte da luta.

Com um homem sábio aprendi que na vida se deve lutar pelo que se almeja independente dos desafios a serem transpostos.

Esse homem sábio é Meu Pai, e a ele e Minha Mãe eu dedico essa nova conquista.

AGRADECIMENTOS

A ***Deus*** e a Nossa Senhora Aparecida, que sempre esta presente e me iluminando em todos os momentos de minha vida.

A toda minha família, em especial aos meus tios Cláudio, Denilson pelo incentivo e apoio, a minha avó Bela e meu avô Antônio, por sempre estar torcendo e orando por mim, as tias Tânia, Fátima e Valéria, pelo carinho e incentivo. Ao meu irmão Gustavo pela amizade e apoio.

Ao professor Zigomar Menezes pela orientação, amizade e companheirismo.

Ao meu segundo pai, Dr. Afonso Peche Filho, pelo exemplo de vida, dedicação e profissionalismo.

Ao Dr. Sérgio Augusto Hiroaki Kurachi, principalmente pelo companheirismo, conhecimento, dedicação, exemplo de honestidade e competência para mim.

Aos meus grandes amigos e todos os funcionários do Laboratório de Solos da Feagri/Unicamp – Campinas – SP. Enfim a todos que tornaram possível a realização deste trabalho.

RESUMO

Variabilidade espacial de atributos do solo e produtividade do feijoeiro em função da geoforma e da irrigação por pivô central

O emprego de irrigação tem promovido alterações na função do tipo de íons e sua valência presentes na solução do solo, forma variável de pH do solo no grau de floculação crítica de partículas. O desequilíbrio e interação deste fatores podem causar alteração na dispersão da fração argila, alterando a estrutura do solo. O objetivo deste trabalho foi verificar o Delta pH do solo e sua relação com o grau de floculação e dispersão de argila no solo e então avaliar o efeito da migração de argila no adensamento do solo, bem como o aumento da compactação do solo no desenvolvimento de raízes no solo e a produtividade alcançada do feijoeiro. O experimento foi realizado na região de Cristalina-GO, em área irrigada sob pivô central, com coordenadas geográficas de 16°53'35,59" de latitude sul e 47°32'16,75" de longitude oeste, 1.021 m de altitude, o solo foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo. Os atributos físicos do solo foram coletados nos pontos de cruzamento de uma malha com intervalos regulares de 10 m entre pontos em três posições ao longo do declive da área com 1,8 ha nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, sob um pivô central, em cada posição da encosta, ou seja, terço superior, médio e inferior foram coletados 60 pontos perfazendo o total de 180 pontos. Os dados foram submetidos a estatística descritiva, bem como a geoestatística considerando os modelos esférico, o exponencial, o linear e o gaussiano, posteriormente, tais modelos foram usados no desenvolvimento de mapas de isolinhas (krigagem). Os resultados confirmam a predominância de carga líquida negativa pelos valores de delta pH alcançados, que provocou o elevado grau de floculação e dispersão do solo causando a movimentação de argila na vertente, contribuindo para o aumento da densidade do solo e a resistência do solo à penetração, a compactação do solo limitou o alcance do sistema radicular do feijoeiro as camadas mais profundas implicando em perdas significativas de produtividade do feijoeiro.

Palavras-chaves: delta pH, argila dispersa em água, raízes, geoestatística.

ABSTRACT

Spatial variability of soil properties and grain yield depending on geoforma and center pivot irrigation

The use of irrigation has promoted changes in the type of ions and their valence present in the soil solution, so variable soil pH in critical flocculation of particles. The imbalance and interaction factors can cause this change in dispersion of clay, changing the soil structure. The objective of this work was to verify the Delta soil pH and its relationship to the degree of flocculation and dispersion of clay in the soil and then assess the effect of the migration of clay in soil compaction and increased soil compaction in the development of roots in the soil and the productivity achieved bean. The experiment was carried out in the region of Crystalline-GO in irrigated area under central pivot, with geographic coordinates of 16 ° 53'35, 59 "south latitude and 47 ° 32'16, 75" W, 1021 m altitude the soil was classified as Ultisol. The physical attributes of soil were collected at the intersections of a grid with intervals of 10 m between points in three positions along the slope area with 1.8 ha at depths of 0.00-0.10, 0.10 -0.20 and 0.20-0.30 m, under a center pivot at each position of the slope, ie the upper, middle and bottom were collected 60 points totaling 180 points. Data were subjected to descriptive statistics and geostatistics models considering spherical, exponential, linear, and Gaussian, then such models were used in the development of maps (kriging). The results confirm the predominance of net negative charge by the values of delta pH achieved, which caused the high degree of flocculation and dispersion of the soil causing the movement of clay in part, contributing to the increase of soil density and soil resistance to penetration soil compaction limited the scope of the root bean deeper layers resulting in significant losses in grain yield.

Keywords: Delta pH; clay dispersed in water; roots; geoestatistics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Semivariograma experimental, adaptado de Siqueira (2006). Onde C_0 = efeito pepita; C_1 = Contribuição do modelo; a = alcance. 10
Figura 2. Desagregação, transporte/sedimentação. (a) decomposição em fragmentos; (b) água da chuva mobiliza os fragmentos pequenos; (c) os fragmentos soltos transportados pelo escoamento superficial, os menores para a sedimentação; (d) ou para parte mais grosseira. Adaptado de Legout et al. (2005). 18
Figura 3. Mapa de localização da área no município de Cristalina-GO e o modelo de elevação digital do terreno em estudo. 22
Figura 4. Precipitação anual da região de Cristalina-GO no ano de 2011, fonte: Instituto nacional de metereologia (INMET)..... 23
Figura 5. Mapa da área de estudos, as setas em negro indicam o caminhamento da água no terreno. .. 23
Figura 6. Representação dos 180 pontos amostrais, georreferenciados a intervalos regulares de 10 m. 24
Figura 7. Extratificação da encosta demarcadas as posições: terço superior, terço médio e inferior da encosta..... 24
Figura 8. Semivariogramas e mapas do teor de areia total (g kg^{-1}), nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. 39
Figura 9. Semivariogramas e mapas da fração areia muito grossa (g kg^{-1}), nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. 40
Figura 10. Semivariogramas e mapas de fração areia grossa (g kg^{-1}), nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20- 0,30 m. 41
Figura 11. Semivariogramas e mapas da fração areia média (g kg^{-1}), nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. 43
Figura 12. Semivariogramas e mapas da fração areia fina (g kg^{-1}), nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. 44
Figura 13. Semivariogramas e mapas da fração areia muito fina (g kg^{-1}), nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. 45
Figura 14. Semivariogramas e mapas da fração silte nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m..... 46
Figura 15. Semivariogramas e mapas da fração argila, nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. 47
Figura 17. Semivariogramas e mapas do grau de floculação da argila (g kg^{-1}), nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. 53
Figura 18. Semivariogramas e mapas do grau de dispersão do solo (g kg^{-1}), nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. 54
Figura 16. Semivariogramas e mapas do atributo delta pH, nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. 55
Figura 19. Semivariogramas e mapas do limite de liquidez do solo (ws), nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. 59
Figura 20. Semivariogramas e mapas do diâmetro médio ponderado-DMP (mm), nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, respectivamente, de acordo com a estratificação do terreno. 62
Figura 21. Semivariogramas e mapas do diâmetro médio geométrico-DMG (mm), nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. 63

Figura 22. Semivariogramas e mapas do atributo densidade do solo (kg dm^{-3}), nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. 73
Figura 23. Semivariogramas e mapas da porosidade total (m^3 m^{-3}), nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. 75
Figura 24. Semivariogramas e mapas da macroporosidade (m^3 m^{-3}), nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. 76
Figura 25. Semivariogramas e mapas de microporosidade, nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. 78
Figura 26. Semivariogramas e mapas da resistência do solo à penetração (MPa), nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. 80
Figura 27. Semivariogramas e mapas de massa de raiz e produtividade da área estudada, nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. 81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Correlação do limite de liquidez e plasticidade pelo penetrômetro de cone de um ponto. Adaptado de SOUZA et al. (2000). 28

Tabela 2. Análise descritiva para os atributos areia total-AT (g kg^{-1}), areia muito grossa-AMG (g kg^{-1}), areia grossa-AG (g kg^{-1}), areia média-AM (g kg^{-1}), areia fina-AF (g kg^{-1}), areia muito fina-AMF (g kg^{-1}), argila (g kg^{-1}) e silte (g kg^{-1}) nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m na estratificação do terreno (terço inferior da encosta) 32

Tabela 3. Análise descritiva para os atributos areia total-AT (g kg^{-1}), areia muito grossa-AMG (g kg^{-1}), areia grossa-AG (g kg^{-1}), areia média-AM (g kg^{-1}), areia fina-AF (g kg^{-1}), areia muito fina-AMF (g kg^{-1}), argila (g kg^{-1}) e silte (g kg^{-1}) nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m na estratificação do terreno (terço médio da encosta) 33

Tabela 4. Análise descritiva para os atributos areia total-AT (g kg^{-1}), areia muito grossa-AMG (g kg^{-1}), areia grossa-AG (g kg^{-1}), areia média-AM (g kg^{-1}), areia fina-AF (g kg^{-1}), areia muito fina-AMF (g kg^{-1}), argila (g kg^{-1}) e silte (g kg^{-1}) nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m na estratificação do terreno (terço superior da encosta). 34

Tabela 5. Parâmetros dos semivariogramas ajustados para os atributos areia total-AT (g kg^{-1}), areia muito grossa-AMG (g kg^{-1}), areia grossa-AG (g kg^{-1}), areia média-AM (g kg^{-1}), areia fina-AF (g kg^{-1}), areia muito fina-AMF (g kg^{-1}), argila (g kg^{-1}) e silte (g kg^{-1}) nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m 37

Tabela 6. Análise descritiva para os atributos grau de floculação da argila-GFA (g kg^{-1}), grau de dispersão da argila-GDA (g kg^{-1}) e delta pH (ΔpH) nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m e a estratificação do terreno (terço inferior, médio e superior da encosta) 49

Tabela 7. Parâmetros dos semivariogramas ajustados aos atributos grau de floculação da argila-GFA (g kg^{-1}), grau de dispersão da argila-GDA (g kg^{-1}) e delta pH (ΔpH) nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m 51

Tabela 8. Análise descritiva para os atributos diâmetro médio geométrico-DMG (mm), diâmetro médio ponderado-DMP (mm) e limite de liquidez-LL (wl) nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m e a estratificação do terreno (terço inferior, médio e superior da encosta) 57

Tabela 9. Parâmetros dos semivariogramas ajustados para os atributos diâmetro médio geométrico-DMG (mm), diâmetro médio ponderado-DMP (mm) e limite de liquidez-LL (ws) nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m 58

Tabela 10. Análise descritiva para os atributos densidade do solo-DS (kg dm^{-3}), macroporosidade (m^3 m^{-3}), microporosidade (m^3 m^{-3}), porosidade total-PT (m^3 m^{-3}) e resistência do solo à penetração-RP (MPa) nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m e a estratificação do terreno (terço inferior, médio e superior da encosta) 65

Tabela 11. Análise descritiva para massa de raízes (g) e produtividade do feijoeiro (g) nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m no terço inferior, médio e superior da encosta .. 66

Tabela 12. Parâmetros dos semivariogramas ajustados para os atributos densidade do solo-DS (kg dm^{-3}), macroporosidade (m^3 m^{-3}), microporosidade (m^3 m^{-3}), porosidade total-PT (m^3 m^{-3}) e resistência do solo à penetração-RP (MPa) nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m 71

Tabela 13. Parâmetros dos semivariogramas ajustados para massa de raízes (g) e produtividade do feijoeiro (kg ha^{-1}) nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m 72

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1
2. OBJETIVOS 2
2.1. Objetivo Geral 3
2.2. Objetivos Específicos 3
3. REVISÃO DE LITERATURA 3
3.1. A cultura do Feijoeiro 3
3.2. Geoestatística 7
3.3. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo 12
3.4. Desenvolvimento do sistema radicular, produtividade e atributos físicos do solo 14
3.5. Influência da relevo e a dinâmica de atributos do solo na paisagem 16
4. MATERIAL E MÉTODOS 21
4.1. Localização e descrição da área de estudo 21
4.2. Coleta das amostras de solo 23
4. 3. Metodologia de Laboratório 25
4. 3.1. Caracterização física 25
a) Análise granulométrica 25
b) Argila dispersa em Água 25
d) Densidade e porosidade do solo 26
e) Estabilidade de agregados 26
f) Teor de água no solo e resistência do solo à penetração 27
4.4. Consistência do solo 27
4.5. Sistema radicular da cultura 28
4.6. Parâmetros biométricos e produtividade da cultura 29
4.7. Análise estatística e geoestatística 29
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO 30
5.1. Análise exploratória de dados de Granulometria do solo 30
5.3. Agregados do solo, limite de liquidez e plasticidade 55
5.4. Análise exploratória dos dados de Densidade do solo, porosidade do solo, resistência do solo à penetração, teor de água no solo, massa de raízes e produtividade do feijoeiro 64

6. CONCLUSÕES.....82
7. REFERÊNCIAS BILIOGRÁFICAS.....83

1. INTRODUÇÃO

O feijão (*Phaseolus vulgaris*) é considerado como um dos alimentos indispensáveis à dieta dos brasileiros, por conter quantidades consideráveis de vitaminas, sais minerais, carboidratos, compostos fenólicos, além de fibras necessárias para o equilíbrio nutricional do ser humano. Na safra 2011/2012 a produção nacional de feijão alcançou em média 2,932 mil toneladas (CONAB, 2012). De acordo com o Ministério da Agricultura e Abastecimento (MAPA, 2012), o Brasil é o maior produtor em nível mundial desta leguminosa, apresentando média anual de 3,5 milhões de toneladas, o consumo interno no país por pessoa alcança em média 16,5 kg de feijão ao ano. A produção se concentra nos estados do Paraná, Bahia, São Paulo, Goiás, Santa Catarina, Rio Grande do Sul, Ceará, Pernambuco e Pará.

A irrigação por aspersão do tipo convencional, auto-propelido e pivô central representam os métodos mais utilizados na cultura do feijoeiro. Considerando a técnica de irrigação por aspersão, o sistema de pivô central é o mais adequado para irrigar áreas individuais e extensas. Por esse motivo é muito utilizado no cultivo de feijão em terras altas na região dos cerrados, em razão de que o retorno financeiro da cultura depende, dentre muitos fatores, da dimensão da área plantada.

No estado de Goiás, segundo a Secretária de Estado e Gestão de Planejamento (SEGPLAN, 2012) o maior polo de irrigação é localizado no município de Cristalina-GO, que se destaca como a maior região produtora de feijão do estado. No ano de 2012 foram produzidas 94,2 mil toneladas de feijão somando as três safras anuais, alcançando 27,72% da produção estadual. Tal desempenho alavancou a participação da região no PIB agrícola nacional de sétimo para segundo lugar até o ano de 2010 (IBGE, 2010).

O início do cultivo do feijoeiro de inverno sob irrigação se deu nos anos 80, despontando interesse por parte dos grandes produtores, estimulando o produtor a utilizar de inovação tecnológica para obter produtividades de 3 a 5 vezes maiores do que as obtidas em sequeiro, em razão do feijão ser uma cultura bem responsiva a irrigação e uso de água, chegando a produzir por volta de 10 kg ha^{-1} mm^{-1} (MUNHOZ-PEREA et al., 2007). Em números o estado de Goiás apresenta 1,78 milhões ha do total da área irrigada no Brasil, sendo 320 mil hectares por pivô central.

A intensificação e desenvolvimento do parque industrial da região de Cristalina-GO se devem a utilização da alta tecnologia dos sistemas de irrigação, principalmente no que diz

respeito à produção de feijão irrigado. Em contrapartida a aplicação de água por meio de irrigação ao solo tem promovido alterações nos atributos químicos e físicos do solo.

As alterações nas condições químicas de solos irrigados são função do tipo de íons e sua valência presentes na solução do solo, forma variável de pH do solo e da floculação de partículas. O desequilíbrio e interação deste fatores podem causar alteração na dispersão da fração argila, modificando a estrutura do solo e reduzindo a estabilidade de agregados do solo, fazendo com que a fração argila fique sujeita ao transporte para regiões de menores cotas e também para horizontes subsuperficiais do solo, por força da chuva ou irrigação. Atribui também modificações na densidade do solo, volume e distribuição de poros, provocando problemas com a infiltração de água no solo, erosão hídrica, formação de encrostamento e selamento superficial, implicando em limitações ao desenvolvimento do sistema radicular.

Estudos demonstram que as geoformas da paisagem também controlam o movimento de água (divergência e convergência) e atributos do solo, influenciando e condicionando ambientes erosionais e depressionais. Portanto, trabalhos sobre a posição e composição do solo na paisagem podem esclarecer as alterações ocorridas nos processos geomórficos, fator que influencia de forma direta na variabilidade espacial de atributos do solo.

A distribuição das frações granulométricas (argila, areia e silte) são relacionados aos índices topográficos e gradiente de declividade. Conhecer a textura do solo é importante para a classificação taxonômica dos mesmos e entender sobre os processos pedogenéticos que atuam no terreno. Em adição, a investigação da variabilidade destes atributos por meio do uso de ferramentas geoestatísticas, que representa um recurso consistente na área de uso e conservação do solo. A geoestatítica está fundamentada na teoria das variáveis regionalizadas por intermédio do semivariograma e do grau de dependência espacial.

Portanto para este trabalho foi testada a hipótese de que o emprego de pivô central por 30 anos na região de Cristalina-Go em área agrícola ao longo do declive, promove a variação do pH do solo e concentração crítica da floculação de partículas, provocando o translocação descendente de argila do horizonte superficial para o subsuperficial, o que resulta no desarranjo de suas partículas e diminuição do espaço poroso, tornando o solo compactado e aumentando a resistência do solo à penetração.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Estudar a variabilidade espacial de atributos físicos do solo, desenvolvimento do sistema radicular e produtividade da cultura do feijão ao longo do declive em área irrigada sob pivô central.

2.2. Objetivos Específicos

1. Caracterizar o pH do solo e argila dispersa em água para a investigação do nível crítico de floculação e dispersão do solo, ao longo do declive irrigado sob irrigação por pivô central.
2. Avaliar a variabilidade espacial da granulometria do solo para definir as classes taxonômicas e processos pedogenéticos atuantes, como transporte de argila subsuperficial do solo, ao longo do declive irrigado por pivô central.
3. Verificar a densidade e porosidade do solo para definir se há o aumento da densidade do solo com o transporte de argila e formação de encrostamento superficial, ao longo do declive irrigado por pivô central.
4. Medir a resistência do solo à penetração para correlacionar com a densidade do solo nas escalas do terreno estudado, ao longo do declive irrigado por pivô central.
5. Avaliar a produtividade da cultura do feijoeiro e volume de raízes para investigar se a densidade do solo tem interferido no seu desenvolvimento diminuindo a taxa de crescimento, ao longo do declive irrigado por pivô central.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. A cultura do Feijoeiro

O feijão (*Phaseolus vulgaris*) é considerado como um dos alimentos indispensáveis à dieta dos brasileiros, por conter quantidades consideráveis de vitaminas, sais minerais e carboidratos, compostos fenólicos, além de fibras necessárias para o equilíbrio nutricional do ser humano.

A produção nacional alcançou 2,932 mil toneladas na safra 2011/2012 (CONAB, 2012). De acordo com o Ministério da Agricultura e Abastecimento (MAPA, 2012), o Brasil é o maior produtor a nível mundial da leguminosa, apresentando média anual de 3,5 milhões de toneladas. O consumo interno no Brasil por pessoa alcança em média 16,5 kg de feijão ao ano.

A produção se concentra nos estados do Paraná, Bahia, São Paulo, Goiás, Santa Catarina, Rio Grande do Sul, Ceará, Pernambuco e Pará. O histórico mostra que o crescimento no consumo está em 1,22% ao ano. O prospecto é de que nos períodos entre 2009/2010 a 2019/2020 passe de 3,7 milhões de toneladas para 4,31 milhões de toneladas.

A cultura representa uma das alternativas financeiras para pequenas propriedades que necessitam de mão-de-obra barata. São em torno de 40 tipos de cultivares existente. O feijão do tipo preto é cultivado em 21% do total da área de produção de feijão no Brasil. Esse tipo de feijão é muito consumido em Santa Catarina, Rio Grande do Sul, leste do Paraná, Rio de Janeiro, sudeste de Minas Gerais e sul do Espirito Santo. Dentre as cultivares de feijão as do tipo carioca são as que têm maior aceitação em nível nacional, visto que 52% da área plantada são semeadas com essa cultivar (MAPA, 2012).

A partir da cultivar carioca com a adoção de tecnologia de melhoramento, a Embrapa Arroz e Feijão apresenta ao mercado no ano de 1996 a cultivar de feijão Pérola. Recomendada para os estados de Goiás, Bahia, Mato Grosso do Sul, Paraná, Rio Grande do Norte, Rondônia, Acre, Espirito Santo e Santa Catarina (EMPRAPA, 1999).

Sobre as características fisiológicas, a cultivar Pérola, apresenta hábito de crescimento indeterminado, porte semi-ereto, coloração das folhas verde claro, flores brancas. As vagens verdes levemente róseas e amarelo areia na colheita. A cor dos grãos é bege clara com rajas marrom clara, massa de 100 sementes em torno de 27 g. O ciclo é curto de aproximadamente 90 dias sendo 46 dias para a floração, exigente em fertilidade do solo e disponibilidade de água. É recomendado para solos de fertilidade média a alta e cultivo irrigado (EMPRAPA, 1999).

O sistema radicular do cultivar pérola é formado por uma raiz principal (raiz primária) na qual são formadas as raízes laterais e/ou secundárias e terciárias. O alcance do sistema radicular do feijoeiro de forma geral atua nas camadas superficiais do solo, ou seja, se concentra na camada de 0,00-0,20 m. Inforzato e Miysaka (1963) trabalhando sob condições tropicais verificaram um volume de biomassa de raízes de 83% na camada superficial do solo (0,00-0,20 m). Neykova et al. (2011) avaliaram a densidade de raízes em um sistema de manejo consorciado intercalando milho (*Zea mays*) e feijão comum (*Faseollus vulgaris*) os autores encontraram que 50% do volume de raízes concentrava-se na faixa de 0,15-0,21 m do solo.

A profundidade efetiva de raízes do cultivar pérola sob condições de irrigação foram avaliados por Bizari et al. (2010), os autores encontraram que a profundidade efetiva do sistema radicular da variedade em questão alcançou 0,00-0,15 m na fase de desenvolvimento vegetativo, 0,00-0,20 m na fase de florescimento e enchimento de grãos e 0,00-0,25 m no início da maturação fisiológica. Wutke et al. (2000) avaliaram os atributos do solo e sistema radicular do feijoeiro irrigado e encontraram um alcance de raízes na faixa de 0,35-0,40 m do solo.

O feijão tem a sua produção caracterizada em três épocas distintas de semeadura. Safra das águas: plantio e colheita são realizados nos períodos onde há maior incidência de chuvas. Na região Centro-Sul este período vai de agosto a dezembro, na região Nordeste de outubro a fevereiro. Safra da seca: período de plantio de dezembro a março. Safra irrigada: colheita de feijão irrigado, concentrando sua produção na região Centro-Sul de abril a junho (MAPA 2012). Para Binotti et al. (2010) o início do cultivo do feijoeiro de inverno sob irrigação se deu nos anos 80, despontando interesse por parte dos grandes produtores, estimulando o produtor a utilizar de inovação tecnológica para obter produtividades de 3 a 5 vezes maiores do que as obtidas em sequeiro, em razão do feijão ser uma cultura bem responsiva a irrigação (EFETHA et al., 2011) e uso de água, sendo que chega a produzir por volta de 10 kg ha^{-1} mm^{-1} (MUNHOZ-PEREA et al., 2007).

Sobre a atual situação do produto feijão no Brasil a safra de 2011/2012 alcançou uma produtividade menor que a 2010/2011, segundo a CONAB (2012) a safra de 2012 apresentou uma diminuição de área na maior parte dos estados produtores. O feijão de primeira safra apresentou um bom desenvolvimento no início da safra em todos os estados produtores. A área cultivada na primeira safra foi de 1.147,8 milhões de hectares, sendo 7,5% menor do que a safra anterior. Obtendo produtividade média de 1.134 kg ha^{-1} e produção de 1.302,2 milhões de toneladas.

Na metade do ciclo produtivo da primeira safra de 2011, apareceram problemas relacionados ao clima considerados significativos, prejudicando a produção dos estados do Paraná, Rio Grande do Sul e Santa Catarina. No estado do Paraná os dados da primeira safra não tiveram relevância nas perdas de produtividade. A região Norte sofreu um decréscimo variando de 5 a 10%. Já a região Sul e Centro Norte que foi castigada com estiagem e baixas temperaturas registra perdas de 25 a 30% na produtividade. A grande perda de produção se

deve a redução da área cultivada. Causado pela descrença dos produtores nos preços praticados na época de plantio (CONAB, 2012).

No apanhado geral a cultura do feijoeiro vem passando por uma instabilidade nos preços praticados. Por todo ciclo produtivo do feijão de primeira safra os preços são instáveis, baixa margem de lucro e fenômenos climáticos, foram determinantes para que os produtores direcionassem parte de sua lavoura a produção de milho e soja (CONAB, 2012).

A segunda safra teve início no começo de dezembro nos estados do Paraná, Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Para os demais estados o início da safra se deu em janeiro. Nesta época se registrou uma reação nos preços e o interesse dos produtores em aumentar á área cultivada. A área cultivada na segunda safra foi de 1.394,6 mil hectares, obtendo produtividade média de 916 kg ha^{-1} e produção de 1.278,1 milhões de toneladas (CONAB, 2012).

Os maiores registros de aumento foram nas regiões que cultivam a maior área de feijão, ou seja, Paraná, Minas Gerais e Goiás. No estado de Mato Grosso que também apresenta produção significativa, os produtores repensaram e estenderão a área cultivada, porém, não bateram os números da safra anterior. Nos estados de São Paulo, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e no Rio Grande do Sul houve uma diminuição na área plantada em razão dos fatores climáticos. Os estados do Maranhão, Piauí, Paraíba e Pernambuco são registrados um aumento de área na intenção de plantio dos produtores. No entanto, o clima não permitiu o início da semeadura, a umidade do solo é baixa, então dificilmente as metas serão cumpridas. Para os estados produtores de feijão de segunda safra na região norte é previsto um aumento de área e o clima se apresenta favorável à produção de feijão (CONAB, 2012).

A terceira safra apresentou decréscimo de produção em comparação às demais safras de acordo com o último levantamento de produção (CONAB, 2012), com área cultivada de 626,1 mil hectares, obtendo produtividade média de 1.197 kg ha^{-1} e produção de 749,6 milhões de toneladas. Porém, na região Centro-Oeste observou-se aumento de produção ao longo das 3 safras, sendo o principal responsável nesse aumento o estado de Goiás, que obteve um incremento de 50% na área plantada e de 51% na produção da segunda para terceira safra.

No estado de Goiás segundo a Secretária de Estado e Gestão de Planejamento - SEGPLAN (CONAB, 2012) a primeira safra de feijão teve de área plantada 51,6 mil hectares, produzindo 119,7 milhões de toneladas, com uma produtividade de 2.320 kg ha^{-1}. Na segunda

safra a área plantada foi 22,6 mil hectares, com uma produção de 52 milhões de toneladas e produtividade média de 2.300 kg ha^{-1}. Já a terceira safra teve 41,4 mil hectares de área plantada, produção de 118,8 mil toneladas e produtividade média de 2.869 k ha^{-1}. O aumento de produtividade por área na terceira safra é influenciado pelo emprego de irrigação, que fornece a aplicação de água adequada durante o ciclo produtivo. Em números o estado de Goiás apresenta 1,78 milhões ha do total da área irrigada no Brasil, sendo 320 mil hectares por pivô central.

O maior polo de irrigação do estado de Goiás é localizado no município de Cristalina que se destaca como a maior região produtora de feijão do estado. No ano de 2012 foram produzidas 94,2 mil toneladas de feijão somando as três safras anuais, alcançando 27,72% da produção estadual. Tal fato alavancou a participação da região no PIB agrícola nacional de sétimo para segundo lugar nos últimos anos (IBGE, 2010).

A intensificação e desenvolvimento do parque industrial da região de Cristalina-GO se devem a utilização da alta tecnologia dos sistemas de irrigação. Principalmente no que diz respeito à produção de feijão.

3.2. Geoestatística

A mineração exploratória na África do Sul por volta dos anos 50 marca o surgimento de uma técnica baseada em teoria empírica para estimar e calcular reservas minerais. O engenheiro Daniel Krige junto ao estatístico H.S. Sichel foram os mentores da ferramenta, que mais tarde era tratada pelo francês G. Matheron pelo nome geoestatística. Com o princípio de estudo das variáveis regionalizadas, ou que possuem continuidade no plano espacial. A metodologia foi aplicada em geologia de minérios, posteriormente ganhou espaço em outras áreas, dentre estas as ciências agrárias.

A aptidão por outros campos pelo uso da geoestatística ganhou espaço em áreas não correlatas a mineração e a geologia. Nos anos 80 a técnica foi bastante explorada pela ciência do solo. Tal fato se deu pela facilidade do processamento computacional, viabilizando os cálculos pontuais utilizados na metodologia (DA SILVA et al., 2011). A metodologia se baseia no conceito de variável aleatória, ou seja, pode apresentar valores distintos por vários pontos amostrais. Comprovando a variabilidade em qualquer escala de espaço (VIEIRA, 2000). A estatística clássica se difere da geoestatística por considerar os valores de pontos

amostrais independentes, enquanto a geoestatística considera os valores de pontos amostrais dependentes espacialmente e também por cada ponto amostral ser referenciado no plano por GPS (DA SILVA et al., 2011).

Teoricamente as variáveis regionalizadas, Z(xi) apresentam aleatoriedade e diferentes pesos Z, coordenado por uma posição X no meio de uma região S, representando pares de coordenadas (xi, yi). A referência do ponto de coordenadas fica a critério do pesquisador. Então um conjunto de atributos Z coletados na área S caracteriza uma função aleatória Z(xi). Portanto, as variáveis Z(xi) medidas dentro da área S podem representar uma função aleatória (DA SILVA et al., 2011). Para Isaaks e Srivastava (1989), essas variáveis apresentam aleatoriedade e representam uma mesma região, então assume a hipótese de dependência espacial, que é explicada por um mecanismo probabilístico.

A explanação da probabilidade de que uma variável dentro de uma região Z(X) representa uma concretização de uma função aleatória Z(Xi) é verdadeira se, esta permitir a inferência total ou ao menos de uma parte da lei de distribuição probabilística que define a função aleatória. Porém, na aplicação prática todo ponto Xi possui somente uma realização Z(xi) e os pontos via de regra são finitos. Tornando impossível a dedução sobre a distribuição de Z(x) (DA SILVA et al., 2011).

As hipóteses consideradas em geoestatística são as de estacionariedade de segunda ordem, valores intrínsecos e tendência ou krigagem universal (VIEIRA et al., 1983). Para Trangmar et al. (1985) a estacionariedade intrínseca também é considerada como forte. A estacionariedade intrínseca é o princípio da geoestatística (OLEA, 1975). Entretanto, compreender o tipo da estacionariedade de primeira ordem se torna imprescindível, levando em consideração que o valor que se espera na função Z(Xi) é igual para toda a área em qualquer ponto ou da distância entre pontos (h).

Na estacionariedade de segunda ordem é determinado que se tenha variância finita, sendo assim fica difícil de ser definida, portanto, não é muito usual (VIEIRA, 2000). Logo a hipótese intrínseca leva em consideração a média dos valores Z(xi) e a variância dos acréscimos Z(xi)-Z(xi+h) acontecem involuntariamente do seu local de amostragem, a função é apenas o valor da distância entre pontos (h). Considera-se somente o semivariograma com o patamar, não exigindo que se tenha a variância finita, então tem uma grande aplicação por ser menos limitativa (VIEIRA, 2000).

A tendência e krigagem universal os pares de dados em conjunto tem uma aumento ilimitado, para todas as distâncias calculadas, ajustado ao modelo matemático que melhor remeta a variabilidade espacial. O semivariograma é fundamentado no suporte a técnica da krigagem que permite a representação quantitativa da variação de um fenômeno regionalizado no espaço, é definida teoricamente com base na teoria de funções aleatórias (BRAGA, 1990) que representa a estimação experimental dessas análises estatísticas. Sendo Z(x) um valor que represente uma variável para o local x, onde x é o vetor (x, y) e Z (x+h) leva o mesmo valor da variável para uma distância qualquer h (ou lag) observado em qualquer direção, então o semivariograma sintetiza a continuidade espacial para todos os pares de valor e para todas as distâncias (h).

O semivariograma é calculado pela seguinte equação:

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

onde: N(h) é o numero de pares dos valores medidos; Z(Xi), Z(Xi+h) são separados por um vetor h.

O semivariograma investiga a distância (h) entre xi e xi+h, encontrando ou não se os elementos possuírem efeito pepita puro. Sendo y*(h) é dependente da distância e não da direção, então o semivariograma pode ser considerado isotrópico. A variabilidade espacial desponta uma correlação entre amostras, diminuído de acordo com o aumento da distância entre pontos amostrais (VIEIRA, 2000).

O ajuste do semivariograma (Figura 1) considera alguns parâmetros, como o efeito pepita (C_0), que ocorre quando o valor que o semivariograma calcula para a distância (h) é zero. Patamar (C_0+C_1), ocorre o aumento da semivariância de acordo com o aumento da distância até que se estabilize. Após a estabilização é denominada de alcance, que representa o limite da dependência espacial, num raio onde todos os elementos são semelhantes e são considerados correlacionados (VIEIRA et al., 1983).

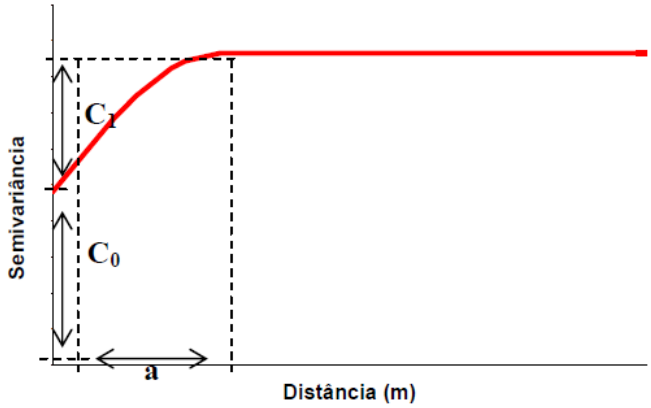


Figura 1. Semivariograma experimental, adaptado de Siqueira (2006). Onde C_0 = efeito pepita; C_1 = Contribuição do modelo; a = alcance.

Na construção de um semivariograma são calculados valores de y(h) relacionando com os respectivos h. O cálculo de h deve ser construído por um número de pares que seja suficiente para tornar os resultados sólidos (LANDIM, 2003). O semivariograma é o primeiro passo para a estimativa geoestatística e também o mais importante, pois o modelo considerado será utilizado em todos os processos de interpolação exercendo influência em todos os resultados. A confecção de um semivariograma pode se dar por várias direções buscando capturar a anisotropia. Na anisotropia os elementos em estudo podem apresentar estrutura espacial diferente conforme a sua posição em X e Y dentro da área estudada (ORTIZ, 2003). Então é feita uma comparação dos semivariogramas calculados nas direções 0º no eixo X, 90º no eixo Y e 45º e -45º nas diagonais.

Se o semivariograma não apresenta preferência por direção é denominado isotrópico (VIEIRA, 2000). Para Ribeiro Junior (1995), o fenômeno de isotropia é dado ao alcance de uma amostra a outra em forma circular, podendo apresentar duas diferentes faces, são elas: anisotropia geométrica e anisotropia zonal. Quanto a anisotropia geométrica decorre quando a estrutura espacial é diferente entre as direções e mantém o mesmo patamar (VIEIRA, 2000). Na anisotropia zonal, alcance e patamar varia de acordo com a direção, isso acontece pela associação a populações distintas. Para Trangmar et al. (1985) esse tipo de anisotropia é comumente observado em solos.

Para a construção do semivariograma os pontos amostrais devem ser distribuídos de acordo com um arranjo regular, considerando também um grupo de pontos amostrais distribuídos de forma irregular, para esse caso se faz necessário introduzir limites de tolerância

entre a direção e distância (DA SILVA et al., 2011). Os modelos isotrópicos utilizados são os de patamar e sem patamar.

Os modelos de patamar são denominados como modelos transitivos. Já os modelos sem patamar, tendem a aumentar de acordo com a distância, é aplicado para modelar fenômenos que apresenta dispersão infinitamente, representado pelo modelo linear (SIQUEIRA, 2006). É comum a utilização dos modelos transitivos que são o esférico, o exponencial e o gaussiano. O modelo esférico tem maior aplicação e é considerado o mais ajustado para delinear o comportamento do solo (TRANGMAR et al., 1987; CAMBARDELLA et al., 1994). Os cálculos de geoestatística são dependentes dos valores aplicados quando está sendo feito o ajuste (VIEIRA et al., 1981). O erro nesta fase atribui falhas a todo o processo.

A krigagem deriva de uma homenagem feita ao engenheiro de minas Krige. Para Rossi et al. (1994) a krigagem apresenta três características que a difere dos demais interpoladores. Ela pode remeter uma estimativa maior ou menor que o valor das amostras, quando nas técnicas clássicas são limitadas ao grau de variação das amostras, a vantagem da utilização de distância e forma geométrica entre pontos amostrais, enquanto os métodos clássicos utilizam as distâncias explanadas na avaliação dos pontos amostrais, e erro esperado, por meio do modelo empírico da continuidade espacial que existe ou da estrutura espacial da distância e direção, empregado pelo semivariograma (DA SILVA et al., 2011).

Para Burrough e McDonnel (1998) quando há abundância de dados a maior parte dos interpoladores geram valores com semelhança. Para Da Silva et al. (2011), os métodos clássicos de interpolação espacial, sendo: triangulação, média local das amostras e distância inversa são encontrados em todos os programas do mercado, porém, suas limitações não permitem a observação de anisotropia e a continuidade da variável em estudo e então fica desconhecida a forma e a orientação da janela para obtenção da ótima estimação. A exploração dos mapas de contorno a partir da krigagem leva a tomada de decisões mais precisas, um exemplo, é sobre a aplicação de fertilizantes ao solo reduzindo seu custo e aumentando a produtividade (DA SILVA et al., 2011).

A construção de mapas de variabilidade espacial dos atributos do solo permite a inferência em zonas de manejo regionalizado, de forma diferenciada e otimizando a

produtividade com o aumento de eficiência no manejo, aumento nos benefícios e diminuição nos custos.

3.3. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo

A variabilidade intrínseca do solo é observada desde á sua formação até o seu estado de equilíbrio devido à desuniformidade de sua matriz, esta que atribui diferentes formas de resistência ao mineral, componentes químicos, localização e ainda diferentes tipos de clima e atividade biológica que o compõe.

A distribuição do solo apresenta forma heterogênea de seus atributos físicos, químicos e biológicos por influência de fatores intrínsecos de relevo ou da relação solo paisagem. Esta característica é observada a uma pequena amplitude de espaço podendo inferir no seu comportamento e em decorrência na produtividade da cultura (AMARO FILHO et al., 2007).

Os atributos físicos do solo têm influencia na melhoria das condições de crescimento, colheita e manutenção da qualidade do solo (RACHMAN et al., 2003; CAVALCANTE et al., 2011). O pleno conhecimento da variabilidade destes atributos contribui para decisões estratégicas de manejo sustentável da exploração do solo (SCHAFFRATH et al., 2008). Para Corá et al. (2004) as áreas que apresentam classificação pedológica análogas podem apresentar variabilidade distinta, influenciada pela forma do manejo, porém, em áreas de caráter pedológico diferentes, mais de mesmo manejo, podem apresentar semelhança entre seus atributos.

Sendo submetido à exploração agrícola o solo têm seus atributos físicos alterados, que são em geral desfavoráveis ao desenvolvimento vegetal (SPERA et al., 2004; VIEIRA; KLEIN, 2007; KLEIN et al., 2009). Esta mudança pode ser observada no sistema de plantio convencional, pela degradação do solo e pela perda da qualidade estrutural (BERTOL et al., 2000; ANTONIANE et al., 2010; TAVARES FILHO; TESSIER, 2010). Da mesma forma no plantio direto pela acumulação dos efeitos da trafegabilidade de máquinas, ou seja, por provocar um rearranjamento das partículas sólidas (STRECK et al., 2004).

A investigação da forma de distribuição dos atributos do solo proporciona uma melhor compreensão da variabilidade espacial na produção das culturas. Para Miao et al. (2006) estudando os atributos do solo, produtividade e qualidade do milho, concluíram que a

maior parte dos atributos estudados apresentaram dependência espacial de intensidade forte a moderada. Kitamura et al. (2007) avaliaram os atributos do feijoeiro e teores de silte, areia e argila com espaçamento entre pontos de 0,10 m em Latossolo Vermelho distroférrico sob plantio direto e encontraram uma dependência espacial dos atributos físicos com alcance de 19,8 m (silte), 103,1 m (areia), e 29,8 m para a produtividade de grãos evidenciando correlação espacial de todos os pares (2 a 2) que representaram o maior coeficiente de correlação.

A forma variável dos atributos físicos do solo influenciados por diferentes tipos de manejo foram estudados por Cavalcante et al. (2011), que concluíram que o sistema plantio direto apresentou maior alcance entre seus atributos. Andreotti et al. (2010) correlacionaram a produtividade da soja com a porosidade e densidade do solo de um Latossolo Vermelho irrigado por pivô central com o espaçamentos de refinamento de 1,82 m^2 e, concluíram que os atributos estudados apresentaram forma variável seguindo padrões bem definidos, sendo que o alcance variou de 31,0 a 63,9 m.

Em trabalho desenvolvido por Duffera et al. (2007) estudando a variabilidade de atributos físicos do solo e, suas relações com as unidades de mapeamento de solos e as práticas de construção de mapas, verificaram uma estrutura espacial horizontal alcançada no mapeamento pela divisão entre os solos arenoso e textura média. Vieira et al. (2010) avaliaram a variabilidade de atributos físicos de um Argissolo Vermelho-Amarelo e espaçamento entre pontos de 0,4 m sob cultivo de seringueira e encontraram dependência espacial para todos os atributos físicos do solo com variação de intensidade moderada a forte e valores de alcance variando entre 15 a 90 m. Jabro et al. (2010) pesquisaram a correlação entre a variabilidade espacial do solo e as propriedades do horizonte Ap e, encontraram uma dependência espacial de intensidade moderada para todo terreno para os atributos físicos em estudo.

Os atributos físico-hídricos do solo foram analisados por Dongli et al. (2010) os autores concluíram que a condutividade hidráulica saturada e teor de água no solo apresenta variabilidade e correlação espacial de intensidade moderada, variando de acordo com o uso do solo. Wijaya et al. (2010) avaliaram a condutividade hidráulica de um solo saturado em campo de arroz e correlacionaram com a percolação em superfície e concluíram que as duas variáveis apresentaram semelhança na variabilidade espacial obtendo as alcances de 46,3 a 51,9 e 26,2 a 27,9 m, respectivamente. Scherpinski et al. (2010) estudaram a variabilidade espacial da

condutividade hidráulica e infiltração de água no solo e encontraram estruturas de dependência espacial nos atributos de condutividade hidráulica do solo e infiltração em uma grade amostral de 50 x 50 m, o raio de dependência alcançado foi de 96,22 m (condutividade hidráulica) e 206,32 (infiltração de água no solo).

Na agricultura de precisão são necessários princípios e ações de manejo de acordo com a variabilidade do terreno, demandando por novas técnicas para mapear a variabilidade espacial das escalas de solo. O avanço em busca da qualidade da estimativa é condicionado pela escolha do método de interpolação. Portanto, estudos investigativos devem ser desenvolvidos no âmbito de melhorar a aplicação das técnicas fornecidas pela ferramenta geoestatística.

3.4. Desenvolvimento do sistema radicular, produtividade e atributos físicos do solo

A habilidade das plantas em extrair água e nutrientes minerais do solo é relacionada à sua capacidade de desenvolver um sistema radicular extenso, logo a compactação nas camadas subsuperficiais atribui limitações ao crescimento radicular.

O enraizamento e a taxa de desenvolvimento bem como a profundidade de alcance das raízes são fundamentais para o suprimento de água em conjunto à absorção de nutrientes, em especial os de baixa mobilidade, sendo que o crescimento do sistema radicular no solo é relacionado à espécie e a seu raio de exploração no solo (LEITNER et al., 2009).

Em relação a espécie o sistema radicular do feijoeiro de forma geral atua nas camadas superficiais do solo, ou seja, se concentra na camada de 0,00-0,20 m. Neykova et al. (2011) avaliaram a densidade de raízes em um sistema de manejo consorciado intercalando milho (*Zea mays*) e feijão comum (*Faseollus vulgaris*) os autores encontraram que 50% do volume de raízes concentrava-se na faixa de 0,15-0,21 m do solo. Wutke et al. (2000) avaliaram os atributos do solo e sistema radicular do feijoeiro irrigado e encontraram um alcance de raízes na faixa de 0,20 até 0,40 m do solo.

O pleno desenvolvimento do sistema radicular está condicionado aos atributos do solo, basicamente agregação e porosidade, portanto, leva em consideração que a estabilidade de uma estrutura é variável e segue uma estreita relação com o caráter intrínseco do solo e com o sistema de manejo empregado e que a compactação provoca uma alteração na disposição espacial, no formato e dimensão de agregados e torrões, por consequência, nos

poros, seja dentro ou entre as distintas unidades, limitando o alongamento de raízes (DEFOSSEZ; RICHARD, 2002; BERTOL et al., 2004; HANZA; ANDERSON, 2005; CARVALHO et al., 2006; CHEN; WEIL, 2011). Megda et al. (2008) encontraram correlação significativa entre a produtividade de grãos de feijão com os atributos físicos do solo.

Os efeitos do sistema de preparo na compactação, disponibilidade hídrica e comportamento do feijoeiro foram estudados por Stone e Silveira (1999), os autores concluíram que as raízes se concentraram em superfície no preparo convencional, enquanto no plantio direto o desenvolvimento das raízes atingiu maior profundidade, em razão do primeiro manejo promover uma compactação entre 0,10 e 0,24 m do solo.

Diferentes tipos de manejo influenciam nos atributos do solo refletindo no desenvolvimento do sistema radicular e na produtividade de culturas agrícolas. Lima et al. (2010) avaliaram a influência da resistência do solo à penetração, causada por diferentes tipos de manejo, sobre a produtividade do feijoeiro e, concluíram que o aumento da resistência diminuiu o índice de área foliar a altura das plantas e redução na produtividade em 59%.

Avaliando a correlação entre a resistência do solo à penetração e a produtividade do feijoeiro, Roque et al. (2008), encontraram uma resistência do solo à penetração de 2,0 MPa apresentando baixa correlação com a produtividade. Montanari et al. (2010) analisaram os aspectos da produtividade do feijão em correlação com os atributos físicos do solo e, concluíram que o estado de compactação do solo estudado promoveu um decréscimo de 26,6% na produtividade do feijão, enquanto os valores de teor de água no solo que alcançaram a média superiores a 0,21 kg kg^{-1} indicaram extratos com maior escalas produtivas.

O manejo agrícola do solo é mais um efeito antrópico que adiciona variabilidade aos atributos do solo, podendo ocorrer de forma diferenciada, mesmo em área aparentemente homogêneas, criando diferentes ambientes de produção agrícola. Mestas et al. (2010) relacionaram atributos físico-hídricos do solo com a produtividade do feijoeiro e constataram a ocorrência de dependência espacial de densidade do solo e condutividade hidráulica saturada relacionada a produção. O consumo de água relacionado à produção em sistema de plantio convencional e plantio direto foi estudado por Bizari et al. (2009) e, observaram que para o último foi notado um maior rendimento de vagens devido às plantas obterem melhor uso da água quando aplicado ao sistema plantio direto.

Avaliando o efeito da compactação do solo sobre o sistema radicular do feijoeiro e da parte aérea, Guimarães et al. (2002), concluíram que a compactação influenciou negativamente no desenvolvimento do sistema radicular e parte aérea do feijoeiro, sendo o efeito mais expressivo em condições de densidade do solo de 1,2 Mg m^{-3}. Collares et al. (2006) avaliaram a qualidade física do solo frente a produtividade do feijoeiro e, verificaram que a resistência do solo à penetração é o fator que interfere no desenvolvimento radicular com mais intensidade alterando a produtividade do feijoeiro.

A dificuldade de diagnosticar a influência negativa da compactação sobre o desenvolvimento radicular é decorrente das várias formas de difusão desta condição no solo, que pode estar relacionada com fatores naturais de adensamento do solo bem como por força de ações antrópicas.

3.5. Influência da relevo e a dinâmica de atributos do solo na paisagem

A posição topográfica (relevo) é um importante fator de formação do solo pelo fato de afetar a estabilidade do solo em razão da gravidade, induzindo a movimentações do solo, fluxos de sedimentos e erosão.

A forma variável de distribuição do gradiente de topografia afeta a produtividade da cultura de forma que seu desenvolvimento se torna mais complexo devido ao aumento da declividade e a sua influência na redistribuição por conta da erosão ou deposição de material (KRAVCHENCO; BULLOCK, 2002; ZEBARTH; JONG, 2003; NIPPERT et al., 2011).

O nível de declive influencia nos atributos químicos do solo como pH, matéria orgânica, óxidos livres, carbonatos e atributos físicos do solo, tais como distribuição granulométrica, teor de umidade do solo, cor, densidade do solo e profundidade de horizontes (PACHEPSKY; RAWLS, 2003; HATTAR et al., 2010; NORTHUP; DANIEL, 2010). O movimento e distribuição sazonal de água na paisagem interfere na distribuição de nutrientes (ZHANG et al., 2011) e processos perdomorfológicos nas encostas, intervindo nos atributos mineralógicos (GESSLER et al., 2000; CAMARGO et al., 2008).

A declividade representa um fator abiótico que comanda o processo pedogenético de uma determinada escala pelo fato da posição das encostas serem mais acentuadas, o que contribui para o escoamento superficial e translocação de material da superfície jusante por meio da erosão superficial e movimento da massa do solo (TSUI et al., 2004). Em ambientes

com intervenção antrópica, como por exemplo, campos irrigados submetidos ao uso continuo do solo exige maior atenção ao sistema de manejo e água da irrigação para evitar que os efeitos degradantes, principalmente em áreas acidentadas, possam interferir na produtividade das culturas (MICHELON et al., 2009).

Os processos ocorrentes na região do topo da paisagem inferem em todo solo da vertente, por conta dos fluxos de energia e movimentação da massa de solo, sendo que essas forças favorecem a pedogênese e os processos que integram o transporte e sedimentação de partículas do solo (WILDING; DRESS, 1983).

A distribuição da fração argila, areia e silte estão relacionados aos índices topográficos e gradiente de declividade. Conhecer a textura do solo é importante para a classificação taxonômica e entender sobre os processos pedogenéticos que atuam no terreno (LEÃO et al., 2010); também para estudos sobre as alterações químicas que ocorrem nos solos agricultáveis, como a concentração de íons da solução do solo (RENGASAMY, 1983). Predominância de carga líquida negativa na solução do solo pode atribuir modificações na dispersão da fração argila, modificando a estrutura do solo (BENITES; MENDONÇA, 1998).

O emprego de irrigação no solo também atribui modificações nos atributos químicos do solo (ABBO GOBAR, 1993; SILVA; SILVA, 2006). Para Sposito (1998) quando o íon dominante é o sódio na água aplicada, provoca desestruturação do solo, aumentando a espessura da dupla camada difusa na superfície das argilas, o que reduz a força de atração entre elas, resultando no aumento da dispersão de partículas. A dispersão da fração argila provoca diminuição na estabilidade de agregados do solo, assim a fração argila fica sujeita ao transporte e sedimentação para os perfis subsuperficiais do solo, sob condições de chuva ou irrigação (SILVA; SILVA, 2006).

O impacto da energia cinética causada pelas gotas da chuva ao entrar em contato com o solo é visto por Bielders e Grymonprez (2010) como o principal agente potencializador da mobilização de partículas no solo. Os autores investigaram a contribuição do impacto das gotas de chuva na eluviação de silte e argila no solo, os resultados mostram que sobre a interação entre o estado de agregação, teor de água inicial e o impacto da queda, o último é apontado como a principal causa da mobilização da massa do solo.

A dispersão provocada pela água promove o desprendimento e exposição da matéria orgânica, que está envolvidas e sua forma física protegida de forças da água ou pedológicas. O

conteúdo de matéria orgânica de baixa densidade na camada superficial é extraída pelo escorrimento superficial esse processo enriquece o material erodido em seguida é redistribuídos ao longo do perfil ou reorientados para as áreas depressionais (POLYAKOV; LAL, 2004).

De acordo com o modelo proposto por Hairsine e Rose (1991) revisado por Legout et al. (2005) três processos são considerados na ocorrência de escorrimento superficial, são eles: (I) Desagregação; (II) Reorientação de sedimentos; (III) Movimentação das partículas. O desprendimento é causado pela impacto das gotas de chuva. A Figura 2 representa o diagrama que explica o caso fase a fase.

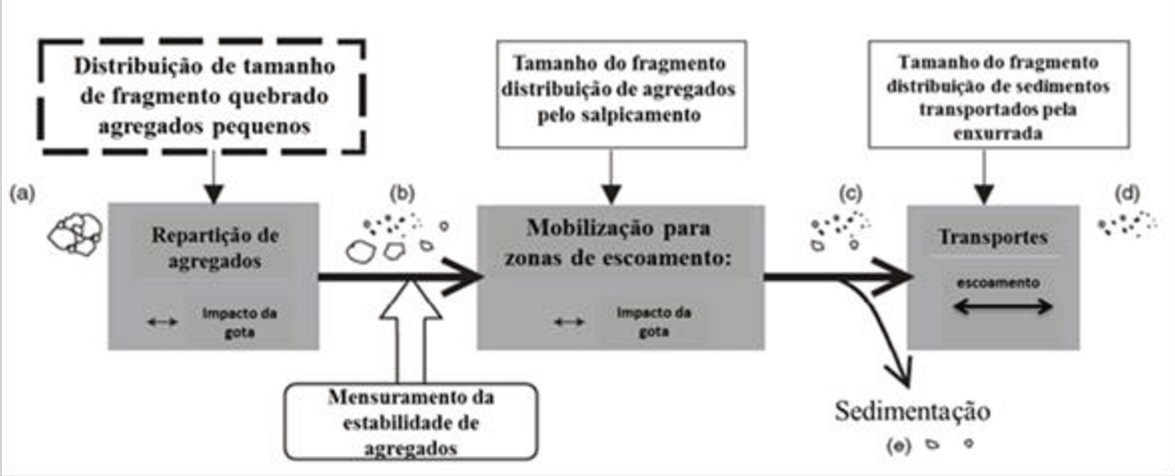


Figura 2. Desagregação, transporte/sedimentação. (a) decomposição em fragmentos; (b) água da chuva mobiliza os fragmentos pequenos; (c) os fragmentos soltos transportados pelo escoamento superficial, os menores para a sedimentação; (d) ou para parte mais grosseira. Adaptado de Legout et al. (2005).

Para Gurbanov (2010) a diferenciação e deformação do solo em áreas irrigadas são dependentes da inclinação do terreno e do fluxo de escoamento de água, levando em consideração que tais características resultam na formação das zonas de escorrimento superficial, estabilização, acumulação na superfície e subsuperfície do solo, este sendo mais agravado em áreas onde são observadas transições de perfis genético e morfológico do solo, afetando a densidade e porosidade do solo.

Em pesquisa desenvolvida pela EMBRAPA (2007) foi comprovado migração de argila do perfil superior do solo, o que contribuiu para a diferença da textura do horizonte Bt e para o C evidenciando a acomodação de sedimentos. A eluviação de argila promove a

distinção das características na superfície relacionada à subsuperfície e o adensamento da faixa subsuperficial do solo, observada na correlação entre argila e densidade do solo, o que provocou o encrostamento superficial e a compactação subsuperficial do solo em estudo.

A avaliação da morfologia superficial do solo contribui na compreensão do comportamento dos atributos físicos, químicos e biológicos que ocorrem na paisagem, observada sua influência na migração de sedimentos e sua capacidade de expressar os processos geológicos e do intemperismo. Essa influência do relevo foi estudada por Demattê e Focht (1999), que concluíram que há ocorrência de alterações no atributos do solo, influenciando na forma e aspectos de absorção.

A declividade coordena o movimento de água e o material em uma encosta contribuindo para variação dos atributos do solo a pequenas escalas de espaço (TSUI et al. 2004). Esses mesmos autores relatam que os atributos do solo apresentaram relação com a posição no relevo, revelando uma separação clara dos atributos químicos do solo com maior concentração de pH, Ca, Mg, C e N disponível na faixa de menor inclinação comparado ao topo da encosta.

Os atributo do solo são alterados pelo relevo, sendo condicionados pela pedoforma do terreno que influencia decisivamente na produtividade das culturas. Tal fato foi pesquisado por Andales et al. (2007), que avaliaram a estabilidade temporal da relação entre posição topográfica e disponibilidade de água e seus efeitos na rotação das culturas como trigo, milho e painço, avaliando as linhas de corte na curva descendente na direção norte em cada seção do terreno tais como o topo, a margem e no terço inferior da encosta. Os autores encontraram uma diferenciação no potencial de distribuição de água nas três posições do terreno, o que certamente reflete em uma variação entre as culturas avaliadas por uma determinada posição na paisagem por influência da topografia e dos atributos do solo. A produção de milho e trigo foi fortemente afetada em razão da posição topográfica, porém, as culturas de rotação não obtiveram efeito significativo. A distribuição sazonal de água no solo entre as posições no terreno foi 69-86% e 86-90% das variações espaço e tempo, influenciando o rendimento de milho e trigo, respectivamente, também de 76-85% e 65-78% da variância de água no perfil do solo com milho e trigo, respectivamente.

A relação entre a produtividade do milho e a variabilidade espacial e temporal de atributos do solo sobre diferentes posições topográficas em áreas irrigadas por pivô central

foram estudadas por Silva e Silva (2008) por quatro anos de cultivo e, verificaram que a média da produtividade do milho irrigado apresentou dependência espacial de intensidade forte sobre os aspectos de topografia confirmados por altos coeficientes de correlação da elevação.

Estudando a relação entre a distância do fluxo de concentração nas linhas e ordenamento do território e a forma variável da produtividade de grãos de milho irrigado por pivô central, Silva e Silva (2006), observaram que a maior concentração do teor de umidade nas linhas de fluxo foi obtida próxima ou superiores as posições mais elevadas, ocorreu um aumento na variabilidade da produção entre a distância da linha de acumulação mostrando que essas variações em situações de sub-irrigação alteram o rendimento do milho irrigado.

O impacto da posição topográfica sobre os atributos do solo, produtividade e condições meteorológicas foi avaliado por Kumhalova et al. (2011), os autores observaram que a relação entre produtividade, declividade e concentração por fluxo se mostrou mais intensa em épocas mais secas comparadas a épocas chuvosas sobre as condições do solo estudado. A diferenciação da topografia e sua influência na produtividade das culturas foram estudadas por Yong et al. (2009) que, observaram menor produtividade quanto maior o declive, sendo embasadas no decréscimo na produção de sorgo e milho de 15,44% e 14,32%, respectivamente, em uma área com 25º de altitude comparada à outra com 0º.

Em trabalho desenvolvido para avaliar a relação solo-paisagem e produtividade de fibra do algodão em sistema de sequeiro, Iqbal et al. (2005), verificaram que a variabilidade de produção de pluma alcançou as médias de 65% no ano de 2001 e 58% para 2002, reflexo dos atributos químicos do solo, já para os atributos topográficos e hidrológicos do solo média de 40 e 21%, respectivamente, seus efeitos combinados, ou seja, o índice de fluxo de sedimentos 82 e 72%, sendo que a direção do fluxo de acordo com a elevação do terreno carreou um teor percentual de areia, o que explicou a maior parte da variação do rendimento de fibra ao longo do declive.

A correlação entre atributos do solo e produtividade da cana-de-açúcar foi avaliada por Souza et al. (2008) esses autores verificaram que a altitude, o teor de matéria orgânica e presença de água representam as variáveis que obtiveram maior correlação com a produtividade da cana. Em análise multifractal da produtividade de grãos de soja e milho relacionados ao declive do terreno, Kravchenko et al. (2000), verificaram que durante quatro safras o rendimento médio de grãos foi atribuído a posições mais baixas do declive. Estudo de

Jiang e Thelen (2004) também evidenciou o efeito da posição topográfica sobre os atributos do solo e a produtividade da soja seguido de milho, os autores constataram que o efeito combinado dos atributos químicos do solo aliado à posição topográfica refletiu em uma forma variável da produção no terreno de soja e milho em sete anos de cultivo.

As diferentes superfícies geomórficas e sua influência sobre os atributos do solo foram estudadas por Sanches et al. (2005) que avaliaram a variabilidade espacial e produção do café em diferentes posições topográficas e, observaram que os atributos químicos e texturais do solo submetidos a manejo intenso apresentam dependência do relevo mesmo em pequena escala e que foi observada uma dependência espacial na produção do café para as superfícies estudadas. No estudo da variabilidade espacial dos atributos do solo e produtividade do arroz ao longo do declive, Ruth e Lennartz (2008) encontraram uma influência significativa da posição do relevo e a distribuição espacial das frações areia, silte e argila, C total e conteúdo de N, condicionando o rendimento de grãos.

A forma variável da distribuição dos atributos do solo tem permitido a visualização e demarcação de extratos de manejo regionalizado, observando seus limites mais precisos. Portanto, estudos sobre a posição e composição do solo na paisagem podem esclarecer as alterações ocorridas nos processos geomórficos, fator que influencia de forma direta na variabilidade espacial de atributos do solo.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Localização e descrição da área de estudo

O experimento foi realizado na região de Cristalina-GO, em área irrigada sob pivô central, com coordenadas geográficas de 16°53’35,59” de latitude sul e 47°32’16,75” de longitude oeste, 1.021 m de altitude (Figura 3). O clima é o tropical com estação seca (Aw), pelo critério de classificação climática de Köppen, tendo verão suave e inverno ameno, com diminuição de chuvas. A área apresenta altitude de 1.025 m e está sobre um Argissolo Vermelho-Amarelo (EMBRAPA, 2006).

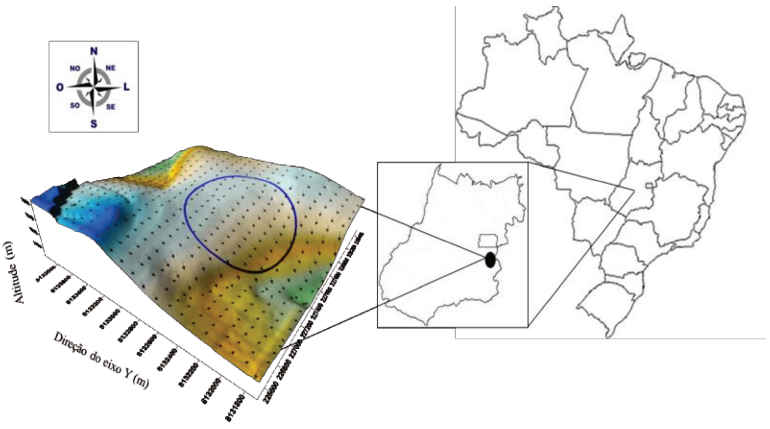


Figura 3. Mapa de localização da área no município de Cristalina-GO e o modelo de elevação digital do terreno em estudo.

A área é cultivada com feijão (*Phaseollus Vulgaris*) em sucessão a cultura da soja (*Glycine Max*), irrigada por pivô central (78 ha), sob o sistema plantio direto. A densidade de plantio foi de 9,4 plantas por metro e realizadas duas operações de fertilização com formulação 10-30-10 totalizando 300 kg ha^{-1} para o plantio e 30-00-20 totalizando 190 kg ha^{-1} em cobertura. A avaliação da cultura foi realizada no período seco avaliando-se o cultivar pérola. O manejo de água foi realizado por aspersão utilizando a técnica de pivô central, sendo a lâmina aplicada correspondente a 50% da evapotranspiração da cultura (ETc), calculada com base na média do ano anterior. Os valores umidade de referência foram estimados a partir do monitoramento da umidade do solo, realizado por tensiometros. A aplicação foi realizada utilizando de 8 a 10 mm a cada dois dias. O equipamento é de marca Valmot e o bico utilizado foi o fixo de giro. A água utilizada na aplicação foi coletada no tanque de captação da fazenda e apresentou os seguintes níveis de elementos: Ca: 1 ppm ; Mg: nível não detectável e N: nível não detectável, condutividade elétrica 7 us cm^{-1}. Na Figura 4 estão apresentados os dados de precipitação (mm) do ano de 2011 na região de Cristalina-GO coletados na estação 036-Cristalina.

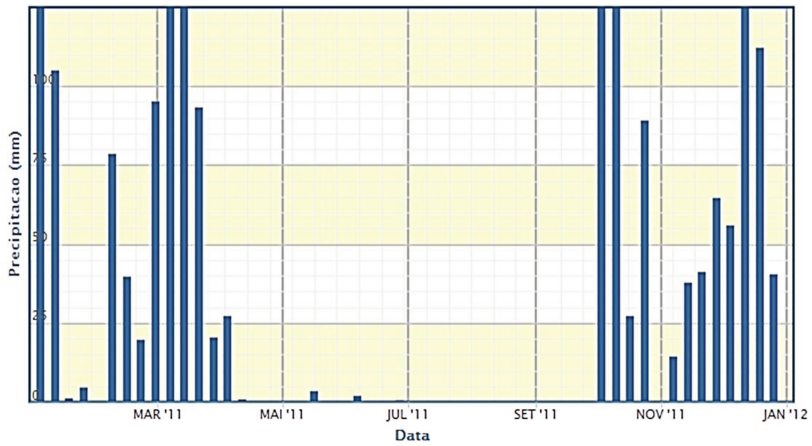


Figura 4. Precipitação anual da região de Cristalina-GO no ano de 2011, fonte: Instituto nacional de metereologia (INMET).

A partir do mapeamento semi-detalhado da área (1,8 hectares), utilizando-se de equipamento de sistema de posição global (GPS) foi elaborado o mapa de elevação digital da área estudada (Figura 5). Observa-se no Mapa que há ocorrência de fluxo acumulado de água, indicado pelas setas, a água caminha no mesmo sentido em toda a encosta.

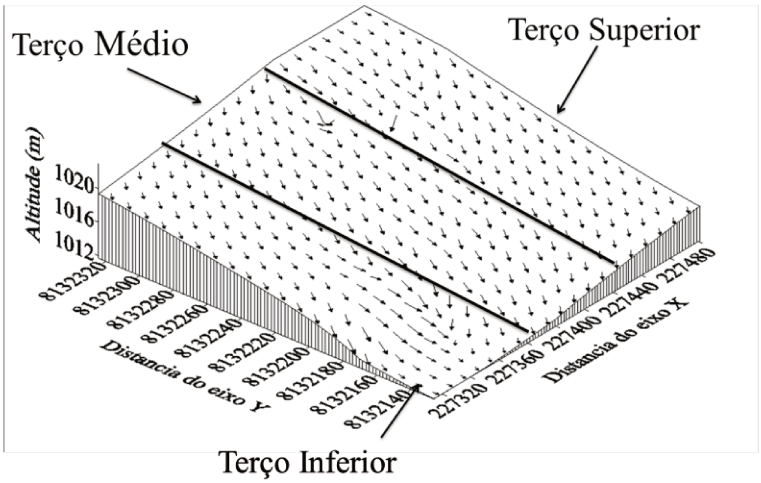


Figura 5. Mapa da área de estudos, as setas em negro indicam o caminhamento da água no terreno.

4.2. Coleta das amostras de solo

Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas para serem utilizadas nas seguintes determinações: consistência do solo, delta pH, teor de água no solo, densidade do

solo, estabilidade de agregados em água, granulometria do solo, porosidade do solo (total, macro e microporosidade). Em seguida foi medida a resistência do solo à penetração na área.

As amostras foram coletadas nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m. Os atributos físicos foram coletados nos pontos de cruzamento de uma malha, com intervalos regulares de 10 m em três posições ao longo do declive da área de 78 ha, sob um pivô central. Em cada posição topográfica, ou seja, terço superior, médio e inferior da encosta (Figura 6), foram coletados 60 pontos perfazendo o total de 180 pontos. (Figura 6). Cada ponto da malha amostral foi georreferenciado, determinando a posição topográfica e altitude, com o auxílio de uma estação total e DGPS.

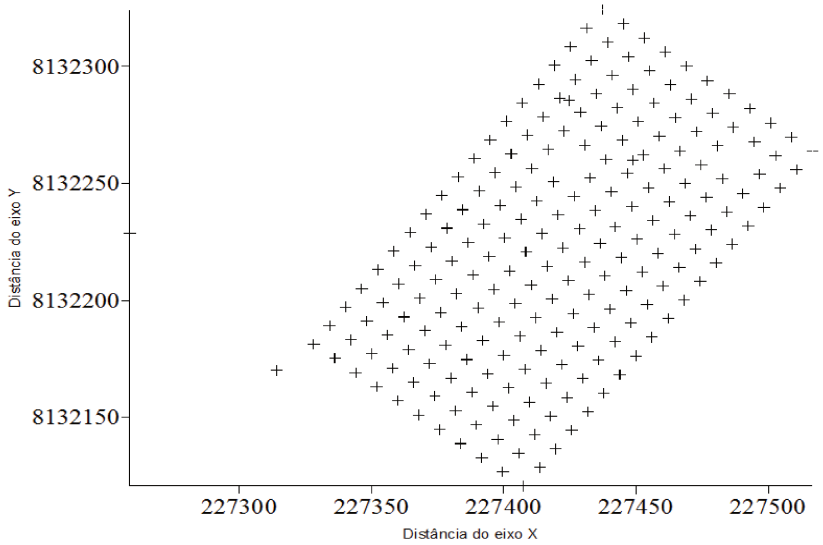


Figura 6. Representação dos 180 pontos amostrais, georreferenciados a intervalos regulares de 10 m.

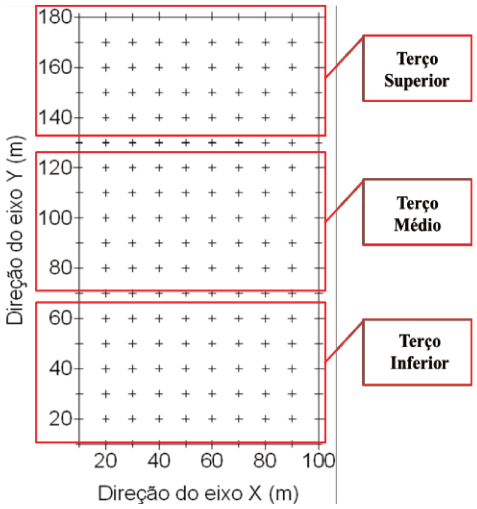


Figura 7. Extratificação da encosta demarcadas as posições: terço superior, terço médio e inferior da encosta.

4. 3. Metodologia de Laboratório

4. 3.1. Caracterização física

A caracterização física do solo foi efetuada ao longo do declive nos 180 pontos dispostos nas 3 posições topográficas, nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

a) Análise granulométrica

Foi realizada pelo método da pipeta, utilizando-se solução de NaOH 0,1N como dispersante químico e agitação com aparato de baixa rotação (CAMARGO et al., 1986). O fracionamento da fração areia foi determinado por meio de tamisamento a seco em cinco subfrações, segundo a escala do Soil Survey Staff USA (1993). A fração areia foi fracionadas em cinco subfrações, muito fina (0,053 mm), fina (0,125 mm), média (0,25 mm), grossa (0,50 mm) e muito grossa (1,00 mm) obedecendo-se ao tempo de sedimentação, por meio da lei de Stokes (JACKSON, 1979). O percentual das frações areia e silte foram recalculados para uma base livre de argila de acordo com a fórmula de Kellog (1962):

$$X = \left({}^{Y}/_{Z}\right) * 100 \quad (1)$$

em que: X-fração de areia ou silte recalculado; Y-fração de areia ou silte na distribuição original (%); Z-soma dos percentuais de silte e areia total na distribuição original (%).

b) Argila dispersa em Água

A argila dispersa em água (ADA) e o grau de floculação (GF) foram determinados adicionando 50 g de solo em um recipiente plástico com capacidade para 250 ml, em seguida foi adicionado 125 ml de água destilada e então a amostra foi agitada com um bastão de vidro e ficou em repouso por uma noite. O conteúdo do copo foi transferido ao pote que foi levado a mesa reciprocante e agitada por 16 horas e as amostras foram transferidas para as provetas de 1.000 ml por um funil, depois foram agitadas por 20 segundos com um bastão e ficaram em repouso por 90 minutos até o procedimento da pipetagem. Paralelamente foi efetuado uma prova em branco e leitura pelo densímetro. Os teores de areia foram descartados (EMBRAPA, 1997).

c) Determinação do Delta pH do solo

Antes das medições o aparelho medidor de pH deve ser calibrado com soluções tampão para 4,0 e 7,0. A leitura foi realizada transferindo 10 cm^3 de solo para um cilindro de vidro provido de tampa contendo as dimensões de 4x4 cm, então foi adicionado 25 ml de água destilada para a determinação do pH em água, separadamente em outro cilindro é adicionado 25 ml de solução de $CaCl_2$, os cilindros são numerados em pares. Em seguida são levados a mesa agitadora por 15 minutos, após a agitação o cilindro é deixado em repouso por 30 minutos para proceder a leitura. O eletrodo de vidro do phmetro é ajustado para tocar o sedimento dentro do cilindro. O pH é lido sem agitação do cilindro depois de atingir o equilíbrio durante 30 minutos. O delta pH é a subtração do valor de pH em $CaCl_2$ pelo pH em água destilada (CAMARGO et al., 1986).

d) Densidade e porosidade do solo

As amostras indeformadas foram coletadas com anéis volumétricos de 0,04 m de altura e 0,05 m de diâmetro. A microporosidade foi determinada em mesa de tensão e correspondeu à umidade volumétrica da amostra submetida a uma tensão de 0,006 MPa, após saturação (EMBRAPA, 1997). A porosidade total e a densidade do solo foram obtidas segundo Embrapa (1997) e a macroporosidade por diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

e) Estabilidade de agregados

Foi avaliada pelo método descrito por Kemper e Chepil (1965), no qual os agregados foram obtidos mediante manipulação com as mãos, aplicando força de tração, sendo usados para peneiramento em água os agregados que passaram na peneira de 9,52 mm e retidos na de 4,76 mm. Após secagem ao ar, os agregados foram colocados em contato com a água sobre a peneira de 4,76 mm por dez minutos. Para peneiramento dos agregados em água, foram utilizadas as peneiras com diâmetros de malha 4,76; 2,00; 1,00; 0,50 e 0,25 mm, separando os agregados nas seguintes classes: C_1 (9,52-4,76 mm), C_2 (4,76-2,0 mm), C_3 (2,0-1,0 mm), C_4 (1,0-0,5 mm), C_5 (0,5-0,25 mm) e C_6 (< 0,25 mm).

f) Teor de água no solo e resistência do solo à penetração

O teor de água no solo foi obtido pelo método gravimétrico em amostras deformadas (EMBRAPA, 1997). Para determinação da resistência do solo à penetração foi utilizado um penetrômetro de impacto (PI) modelo IAA/Planalsucar, descrito por Stolf (1991), com um ângulo de cone de 30°. A transformação da penetração da haste do aparelho no solo (cm/impacto) em resistência à penetração foi obtida pela fórmula dos holandeses, segundo Stolf (1991), descrita na equação 2.

$$RP = \frac{(Mg+mg)+\left(\frac{M}{M+m} * \frac{Mg*h}{x}\right)}{A} \quad (2)$$

em que: RP - resistência mecânica do solo à penetração, kgf cm^{-2}; M - massa do êmbolo (4 kg) (Mg = 4 kgf); m - massa do aparelho sem êmbolo (3,2 kg); h - altura de queda do êmbolo, 40 cm; x - penetração da haste do aparelho, cm $impacto^{-1}$; A - área do cone, 1,29 cm^2, e g - aceleração da gravidade (9,8 m s^{-2}).

4.4. Consistência do solo

O limite de liquidez foi determinado pelo método do penetrômetro de cone. Procedeu-se a homogeneização da amostra, colocando-a em uma placa de vidro e trabalhando com uma espátula; esta amostra foi colocada na cápsula do aparelho para efetuar-se a medição, enchendo até o topo e pressionando contra as paredes e o fundo da cápsula, evitando a formação de bolhas de ar dentro da amostra.

Os ensaios foram iniciados quando a ponta do cone estava tangenciando a superfície da amostra. Com o aparelho travado e zerado, em seguida, foi liberado o cone, penetrando na amostra durante 5 segundos, programados no temporizador do aparelho. O valor da profundidade de penetração atingida pelo cone foi lido na escala do penetrômetro, então se retiraram aproximadamente 15 g em torno do ponto de penetração, para determinação da umidade, buscando-se que o intervalo de valores de penetração do cone na amostra estivesse na faixa de 15 a 25 mm.

O solo restante na cápsula foi retirado e agregado ao restante da amostra contida na placa de vidro, em seguida foi adicionado mais água, formando-se uma nova pasta, para a qual se repetiu o ensaio. Este procedimento foi realizado três vezes, obtendo-se quatro pares dos valores de penetração e umidade, para cada repetição. Representou-se, num gráfico, a leitura

da penetração na ordenada e a umidade na abscissa, depois, traçou-se a reta que melhor se ajustou aos pontos e o valor de umidade correspondente a 20 mm de penetração foi considerado limite de liquidez. Após a determinação de dois valores consecutivos da profundidade de penetração, retirou-se o solo da região penetrada, para determinar a umidade, que foi expressa com precisão de 0,1% e, só então, multiplicada por um fator apresentado na Tabela 1 obteve-se o limite de liquidez do solo; a tabela indica, também, a que grupo de plasticidade o solo pertence (SOUZA et al., 2000).

Tabela 1. Correlação do limite de liquidez e plasticidade pelo penetrômetro de cone de um ponto. Adaptado de SOUZA et al. (2000).

Penetração	Plasticidade		
(mm)	Alta	Intermediária	Baixa
15	1,098	1,094	1,057
16	1,075	1,076	1,052
17	1,055	1,058	1,042
18	1,036	1,039	1,030
19	1,018	1,020	1,015
20	1,001	1,001	1,006
21	0,984	0,984	0,984
22	0,987	0,968	0,971
23	0,949	0,954	0,961
24	0,929	0,943	0,955
25	0,909	0,934	0,954
Umidade	Acima de 50%	Entre 35 e 50%	Abaixo de 35%

4.5. Sistema radicular da cultura

O sistema radicular foi avaliado retirando-se duas sub-amostras na entrelinha da cultura até 0,30 m de profundidade em intervalo de 0,10 m com trado de 0,71 m de diâmetro adaptado de Fujiwara et al. (1994). O volume de solo de cada camada avaliada foi lavado em peneiras de malha de 2,0 mm e as raízes foram secas em estufa a 70ºC por 96 horas. Em seguida separadas as impurezas como solo e palha presentes na amostra e então pesadas na balança semi-analítica. Para obtenção dos dados de cada ponto foi calculada a média das sub-amostras coletadas.

4.6. Parâmetros biométricos e produtividade da cultura

A amostragem foi realizada nos 180 pontos da malha, em cada ponto foram coletadas todas as plantas presentes numa área de 1,0 m^2 (1,0 x 1,0 m), utilizando um gabarito de madeira. Avaliando os componentes de rendimentos: índice de vagens por planta, grãos por vagem e o peso de 1.000 grãos. As vagens foram separadas e pesadas. O peso de 1.000 grãos foi avaliado por meio da determinação da massa de 1.000 grãos, separada manualmente.

4.7. Análise estatística e geoestatística

Os atributos físicos do solo, o desenvolvimento do sistema radicular e a produtividade da cultura do feijão foram avaliados por meio da análise estatística descritiva, sendo calculados a média, mediana, desvio padrão, valores máximos e mínimos, coeficiente de variação, coeficiente de assimetria e coeficiente de curtose. A hipótese de normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, por meio do programa computacional SAS (SCHLOTZHAVER; LITTELL, 1997). Os valores de atributos maiores do que a média mais quatro desvios-padrões foram descartados (CAHN et al., 1994). O número de dados descartados foi sempre inferior a 10% de cada conjunto de 180 dados.

O terreno foi estratificado em três partes sendo: parte 1, do ponto 0 ao 60; parte 2, do ponto 60 ao 120 e 3, do ponto 120 ao 180, para as três profundidades estudadas. Para verificar se há diferença entre os atributos do solo, foi aplicado o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A dependência espacial foi analisada por meio de ajustes de semivariogramas (VIEIRA, 2000), com base na pressuposição de estacionariedade da hipótese intrínseca, a qual é estimada por:

$$\gamma^{*}(h) = \frac{1}{2\,N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z\,(x_i + h)]^2 \qquad (3)$$

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. O semivariograma é representado pelo gráfico $\hat{\gamma}(h)$ *versus* h. Do ajuste de um modelo matemático aos valores calculados de $\hat{\gamma}(h)$, são estimados os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma (o efeito pepita, $\mathbf{C_0}$; patamar, $\mathbf{C_0+C_1}$; e o alcance, **a**).

Para analisar o grau da dependência espacial dos atributos em estudo, foi utilizado a classificação de Cambardella et al. (1994), em que são considerados de dependência espacial

forte os semivariogramas que têm efeito pepita < 25% do patamar, moderada quando está entre 25 e 75% e fraca, > 75%.

Os modelos de semivariogramas considerados foram o esférico, o exponencial, o linear e o gaussiano, sendo ajustados por meio do programa GS^+ (ROBERTSON, 1998). Posteriormente, tais modelos foram usados no desenvolvimento de mapas de isolinhas (krigagem). Em caso de dúvida entre mais de um modelo para o mesmo semivariograma, foi considerado o maior valor do coeficiente de correlação obtido pelo método de validação cruzada. Para elaboração dos mapas de distribuição espacial das variáveis, foi utilizado o programa Surfer (GOLDEN SOFTWARE, 1999).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Análise exploratória de dados de granulometria do solo

Todas as variáveis granulométricas apresentaram distribuição normal nas três profundidades estudadas, exceto AG e AMG que não apresentaram normalidade submetidos ao teste de Kolmogorov Smirnov (Tabela 2, 3 e 4). Os valores de média e mediana das frações em estudo são próximos, indicando que os dados não possuem assimetria acentuada. Santos et al. (2012) observaram normalidade para as frações AT, Argila, Silte trabalhando com solos do vale aluvial do semiárido. Miqueloni e Bueno (2011) trabalhando em Argissolo Vermelho-Amarelo, também encontraram normalidade para as frações AM, AF e AMF e Souza et al. (2003) encontraram normalidade para os atributos AG e AMG trabalhando com Latossolo Vermelho em Jaboticabal-SP.

Para Little e Hills (1978), quando há semelhança entre os valores da média, mediana e moda, os valores podem apresentar ou se aproximar da normalidade, evidenciando que pode representar uma referência de que as medidas de tendência central não tem domínio de valores discrepantes na sua distribuição (CAMBARDELLA et al., 1994), portanto, os atributos granulométricos relacionados no estudo aproximam-se de uma distribuição normal (Tabelas 2, 3 e 4). Sendo assim os dados são considerados adequados para o emprego de geoestatística.

O coeficiente de variação (CV%) não possui uma unidade física que o defina, portanto, permite que dados oriundos de diferentes atributos do solo possam ser comparados (Tabelas 2, 3 e 4). Um valor de CV considerado elevado pode ser um indicativo de que os dados estudados não são homogêneos. Com base na classificação de Warrick e Nielsen

(1980), a areia total nas três profundidades estudadas e areia muito fina na profundidade de 0,20-0,30 apresentou um baixo CV (>12%), concordando com dos resultados obtidos por Kitamura et al. (2007) que observaram um CV médio para areia total do solo (Tabela 2, 3 e 4). A areia muito fina, areia fina, areia média e argila na profundidade de 0,00-0,10 m, areia muito fina, areia fina, areia média e argila na profundidade de 0,10-0,20 m e areia média, areia fina, argila e silte na profundidade de 0,20-0,30 m apresentaram CV médio, corroborando com Barbieri et al. (2002) e Gonçalves e Folegatti (2002) que classificaram fração argila como CV médio para essa faixa do solo. As frações de areia muito grossa nas três profundidades estudadas apresentaram CV alto (>24%).

De acordo com os testes de média dos atributos granulométricos na profundidade de 0,00-0,10 m, verifica-se que há uma diferença significativa para os teores de argila e silte no solo no terço médio superior da encosta (Tabela 2). No entanto a maior concentração de argila e silte foram evidenciadas nos terços inferior e baixo da encosta. Na profundidade de 0,10-0,20 m, a quantidade de argila e silte são maiores comparada a primeira profundidade e sua maior concentração esta no terço médio inferior, apresentando um comportamento diferente da profundidade de 0,00-0,10 m. Na profundidade de 0,00-0,10 m os maiores valores são evidenciados nos terços médio e superior da encosta.

Tabela 2. Análise descritiva para os atributos areia total-AT (g kg^{-1}), areia muito grossa-AMG (g kg^{-1}), areia grossa-AG (g kg^{-1}), areia média-AM (g kg^{-1}), areia fina-AF (g kg^{-1}), areia muito fina-AMF (g kg^{-1}), argila (g kg^{-1}) e silte (g kg^{-1}) nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m no terço inferior da encosta.

Variável	Prof. (m)	[1]Média	Mediana	[2]CV	Assimetria	Curtose
AT	0,0-0,1	568,53 a	565,50	10,00	0,33	0,00
	0,1-0,2	582,40 a	576,50	10,03	0,11	-0,14
	0,2-0,3	576,06 b	575,50	9,80	0,43	-0,76
AMG	0,0-0,1	6,03 a	5,00	88,54	1,64	2,21
	0,1-0,2	6,77 b	5,00	81,48	2,03	4,04
	0,2-0,3	6,77 b	5,00	81,48	2,03	4,04
AG	0,0-0,1	13,26 a	10,00	72,35	2,05	4,33
	0,1-0,2	11,27 b	10,00	54,83	2,76	10,58
	0,2-0,3	10,81 a	9,00	53,27	2,00	5,14
AM	0,0-0,1	148,58 a	140,00	18,65	0,64	0,20
	0,1-0,2	149,45 b	147,00	15,71	0,31	-0,64
	0,2-0,3	146,10 b	141,00	20,73	0,80	0,30
AF	0,0-0,1	304,33 a	304,5	12,44	-0,38	0,39
	0,1-0,2	319,83 a	321,00	11,17	-0,21	-0,38
	0,2-0,3	316,47 a	317,00	10,09	0,56	0,78
AMF	0,0-0,1	94,65 b	93,00	10,37	0,21	-0,80
	0,1-0,2	97,27 a	96,00	11,53	-0,02	-0,28
	0,2-0,3	97,27 a	96,00	11,53	-0,02	-0,28
Argila	0,0-0,1	364,83 b	371,25	14,92	-0,35	-0,08
	0,1-0,2	363,70 b	375,75	16,91	-0,61	0,45
	0,2-0,3	369,96 a	387,00	17,49	-0,86	0,17
Silte	0,0-0,1	66,56 a	60,50	46,21	1,67	4,55
	0,1-0,2	54,20 b	51,50	39,27	1,20	4,73
	0,2-0,3	52,79 b	50,00	57,27	2,84	15,66

[1]Médias seguidas pela das mesmas letras na linhas não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey; [2]CV = Coeficiente de Variação.

Tabela 3. Análise descritiva para os atributos areia total-AT (g kg^{-1}), areia muito grossa-AMG (g kg^{-1}), areia grossa-AG (g kg^{-1}), areia média-AM (g kg^{-1}), areia fina-AF (g kg^{-1}), areia muito fina-AMF (g kg^{-1}), argila (g kg^{-1}) e silte (g kg^{-1}) nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m no terço médio da encosta.

Variável	Prof. (m)	[1]Média	Mediana	[2]CV	Assimetria	Curtose
AT	0,0-0,1	559,61 a	570,00	10,43	-1,22	1,45
	0,1-0,2	548,08 a	568,00	9,95	-1,18	0,83
	0,2-0,3	534,07 b	554,50	10,87	-0,51	-0,45
AMG	0,0-0,1	4,35 a	4,00	54,72	1,58	3,67
	0,1-0,2	4,43 b	3,00	62,28	1,11	0,18
	0,2-0,3	4,43 b	3,00	62,28	1,11	0,18
AG	0,0-0,1	4,30 b	4,00	55,78	1,59	3,63
	0,1-0,2	8,19 a	8,00	51,34	1,14	1,34
	0,2-0,3	8,25 a	8,00	33,64	0,02	0,70
AM	0,0-0,1	4,30 b	4,00	55,67	1,58	3,61
	0,1-0,2	136,68 b	135,00	133,33	0,00	-0,25
	0,2-0,3	132,09 b	132,00	14,62	-0,17	-0,93
AF	0,0-0,1	307,06 a	312,00	0,14	-1,14	1,09
	0,1-0,2	310,22 a	324,00	13,41	-1,22	0,95
	0,2-0,3	301,01 a	312,00	13,72	-0,65	0,13
AMF	0,0-0,1	94,81 a	91,00	21,03	0,23	0,91
	0,1-0,2	91,96 b	94,00	16,72	-0,19	4,44
	0,2-0,3	91,96 b	94,00	16,72	-0,19	4,44
Argila	0,0-0,1	384,97 b	375,00	13,82	0,75	0,05
	0,1-0,2	388,81 a	378,50	11,37	1,17	1,02
	0,2-0,3	405,20 a	393,00	12,08	0,17	-0,06
Silte	0,0-0,1	58,35 a	57,00	33,91	1,01	3,15
	0,1-0,2	58,94 a	51,00	54,17	5,04	31,27
	0,2-0,3	56,49 a	55,00	30,85	0,90	2,96

[1]Médias seguidas pela das mesmas letras na linhas não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey; [2]CV = Coeficiente de Variação.

Tabela 4. Análise descritiva para os atributos areia total-AT (g kg^{-1}), areia muito grossa-AMG (g kg^{-1}), areia grossa-AG (g kg^{-1}), areia média-AM (g kg^{-1}), areia fina-AF (g kg^{-1}), areia muito fina-AMF (g kg^{-1}), argila (g kg^{-1}) e silte (g kg^{-1}) nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m no terço superior da encosta.

Variável	Prof. (m)	[1]Média	Mediana	[2]CV	Assimetria	Curtose
AT	0,0-0,1	530, 46 a	537,00	11,50	0,13	-0,43
	0,1-0,2	529,56 a	540,50	10,99	-0,20	-0,96
	0,2-0,3	529,56 a	540,50	10,99	-0,20	-0,96
AMG	0,0-0,1	5,01 a	4,00	60,25	3,48	17,17
	0,1-0,2	4,13 b	4,00	44,77	0,48	-0,66
	0,2-0,3	4,13 b	4,00	44,77	0,48	-0,66
AG	0,0-0,1	150,00 a	150,00	11,45	-	-1,2
	0,1-0,2	8,74 b	8,00	33,61	0,51	1,83
	0,2-0,3	8,25 b	8,00	33,64	0,02	0,70
AM	0,0-0,1	131,10 a	130,00	20,38	-1,05	7,10
	0,1-0,2	129,83 b	132,00	12,39	0,01	-0,25
	0,2-0,3	123,54 b	126,00	12,35	0,08	-0,27
AF	0,0-0,1	285,89 a	287,00	13,85	0,03	-0,69
	0,1-0,2	285,66 a	291,00	13,58	-0,24	-0,99
	0,2-0,3	286,90 a	290,00	11,30	-0,01	-1,14
AMF	0,0-0,1	98,72 b	101,00	10,76	-0,33	-0,60
	0,1-0,2	102,57 a	101,00	17,47	2,32	11,05
	0,2-0,3	102,57 a	101,00	17,47	2,32	11,05
Argila	0,0-0,1	392,56 b	387,00	17,49	-0,86	0,17
	0,1-0,2	411,89 a	406,5	12,08	0,02	-0,63
	0,2-0,3	420,41 a	425,50	11,04	-0,05	-1,17
Silte	0,0-0,1	64,27 a	60,00	32,97	1,75	3,90
	0,1-0,2	59,57 a	59,00	26,07	0,97	0,91
	0,2-0,3	55,63 a	55,00	22,31	0,36	0,86

[1]Médias seguidas pela das mesmas letras na linhas não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey; [2]CV = Coeficiente de Variação.

Os valores de argila e silte são maiores nas profundidades de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, quando comparada a profundidade de 0,0-0,10 m demonstrando que as partículas finas do solo se concentram nas camadas subsuperficiais do solo (Tabela 2, 3 e 4). Para Campos (2006) a forma variável do relevo exerce uma forte influência no processo de transporte e deposição de sedimentos, promovendo a migração de partículas finas ao longo do perfil do solo. A EMBRAPA (2007), investigando o adensamento de solos irrigados na zona semi-árida, constatou que as perdas de argila na faixa superior do perfil do solo contribuíram para o maior volume de argila no horizonte Bt do solo estudado, indicando que houve o rearranjamento dessas partículas, resultante da movimentação de argila no solo. A argila dispersa e reorientada no perfil do solo para as partes subsuperficiais é conhecido como um processo natural (CAMBRERA-MARTINEZ et al., 1989), em contrapartida, a migração de partículas finas é favorecida em solos agricultáveis, por conta da modificação estabelecida pelo manejo, deixando a fração argila com uma maior concentração crítica de dispersão.

O comportamento da areia total ocorre opostamente ao da argila, nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, os valores de AT diminuem de acordo com a posição no terreno, visto que a menor média foi verificada no terço superior (Tabela 2). A evidencia de que as partículas mais finas que compõe a areia nas faixas de acúmulo do terreno e maiores partículas nas áreas de maior elevação, demostrando que há o transporte de sedimentos seletivo, sendo regulado pela declividade do terreno (HAAN et al., 1994; MIQUELONI; BUENO, 2011).

A análise do comportamento da AMG e AG na profundidade de 0,00-0,10 m, demonstra que o conteúdo desses atributos concentra no terço superior de encosta nas profundidade estudadas (Tabelas 2, 3 e 4), comprovando que o movimento dessa fração no solo foi menor por conta do volume das partículas. Comportamento também observado por SOUZA et al. (2004), trabalhando com Latossolo Vermelho na região de Jaboticabal.

Os valores de AM e AF demonstram que essas duas frações contribuíram com o maior componente da areia total do solo nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m (Tabela 2, 3 e 4). Para as frações AM, AF e AMF nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, os maiores valores são evidenciados nas posições de maior declive (terço médio e superior da encosta), evidenciando uma maior taxa de transporte dessas partículas no solo. Resultados semelhantes foram observados por Souza et al. (2004), que estudando a

variabilidade espacial da textura de um Latossolo Vermelho verificaram maiores teores das frações AM e AF na menor cota do terreno.

Nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, foi reforçada a hipótese de seletividade na remoção de sedimentos, visto que os valores das frações AM e AF também diminuem de acordo com a profundidade e posição no terreno, sendo observado os maiores valores nas posições mais elevadas (Tabelas 3 e 4). Para Souza et al. (2004), o transporte de partículas foi diferenciado seguindo a forma da vertente e condicionando os atributos físicos e químicos do solo.

Na profundidade de 0,00-0,10 m, a argila obteve um alcance médio de 60,40 m aumentando progressivamente no perfil do solo (Tabela 5), na camada de 0,10-0,20 o alcance foi de 87,00 m e na camada de 0,20-0,30 m de 99,30 m. O alcance reflete a magnitude de dependência espacial de determinado atributo no solo, portanto, os menores alcances na camada superficial podem ser explicados pela maior homogeneidade desse atributo no solo. Para Grego e Vieira (2005) a movimentação do solo adiciona mais variabilidade aos atributos do solo, particularmente na camada superficial.

Os valores de alcance para o atributo silte foram de 16,70, 57,9 e 20,10 m, para as profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, respectivamente (Tabela 5). Sendo explicado pelo fato de que há a ocorrência de variabilidade natural dos dados avaliados quando submetidos à repetição, de acordo com a metodologia empregada. A areia total na profundidade de 0,0-0,10 m, obteve um alcance médio de 53,80 m, na profundidade de 0,10-0,20 m o alcance foi de 15,60 m e, na profundidade de 0,20-0,30 m, o alcance foi de 15,62 m. Concordando com Santos et al. (2012), essa forma variável de alcances pode ser atribuída aos processos geomorfológicos que ocorrem na vertente (transporte e sedimentação), adicionando mais variabilidade a distribuição espacial do solo.

Tabela 5. Parâmetros dos semivariogramas ajustados para os atributos areia total-AT (g kg^{-1}), areia muito grossa-AMG (g kg^{-1}), areia grossa-AG (g kg^{-1}), areia média-AM (g kg^{-1}), areia fina-AF (g kg^{-1}), areia muito fina-AMF (g kg^{-1}), argila (g kg^{-1}) e silte (g kg^{-1}) nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

Variável	Prof. (m)	Modelo[5]	[1]C_0	Patamar	[2]C_0/C_0+C_1	[3]R^2	Alcance	[4]PV^1
AT	0,0-0,1	Exp	1,62	1992,0	3985,0	0,97	53,80	<0,0100
	0,1-0,2	Exp	1,67	370	3597,0	0,95	15,60	<0,0100
	0,2-0,3	Exp	1,69	373	3577,0	0,93	15,65	<0,0100
AMG	0,0-0,1	Exp	2,12	4,25	0,5	0,93	110,40	<0,0100
	0,1-0,2	Exp	0,59	5,34	0,89	0,31	14,40	<0,0100
	0,2-0,3	Exp	0,69	6,01	0,88	0,54	20,40	<0,0100
AG	0,0-0,1	Exp	0,88	8,68	0,89	0,53	24,30	<0,0100
	0,1-0,2	Exp	1,95	16,94	0,88	0,91	31,20	<0,0100
	0,2-0,3	Exp	1,11	9,29	0,88	0,67	25,80	<0,0100
AM	0,0-0,1	Exp	209,30	454,40	0,53	0,92	93,60	0,0368
	0,1-0,2	Exp	49,00	387,30	0,87	0,53	28,50	<0,0100
	0,2-0,3	Exp	45,00	489,20	0,90	0,68	23,10	0,1169
AF	0,0-0,1	Esf	703,00	1486,00	0,52	0,91	59,20	>0,1500
	0,1-0,2	Esf	814,00	1781,00	0,54	0,94	42,10	<0,0100
	0,2-0,3	Esf	703,00	1407,00	0,50	0,84	39,30	0,1299
AMF	0,0-0,1	Esf	38,60	126,20	0,69	0,72	23,80	<0,0100
	0,1-0,2	Exp	30,7	238,7	0,87	0,59	21,3	<0,0100
	0,2-0,3	Esf	40,10	114,70	0,65	0,63	28,1	>0,1500
Argila	0,0-0,1	Esf	1616,0	3233,00	0,50	0,80	60,40	>0,1500
	0,1-0,2	Exp	1611,0	3330,00	0,51	0,85	87,30	<0,0100
	0,2-0,3	Exp	1463,0	3047,00	0,52	0,90	99,30	0,0651
Silte	0,0-0,1	Esf	40,00	554,10	0,92	0,64	16,70	<0,0100
	0,1-0,2	Exp	160,7	349,8	0,54	0,73	57,9	<0,0100
	0,2-0,3	Esf	1,70	155,30	0,98	0,80	20,10	<0,0100

[1]C_0 = Efeito Pepita; [2]C_0/C_0+C_1 = Grau de dependência espacial; [3]R^2 = Coeficiente de determinação; [4]PV^1 = teste de Komogorov-Smirnov; [5]EXP = exponencial, ESF = esférico e GAUS = gaussiano.

Para AMG e AM na profundidade de 0,00-0,10 m, foi atribuído um alcance alto (110,40 m) e (93,60 m), respectivamente (Tabela 5). As frações AMG e AM nas profundidades de 0,0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30m, apresentaram alcances baixos, bem como as frações AG, AF e AMF nas três profundidades estudadas. De acordo com Corá et al. (2004) há influencia dos valores de alcance nas observações e conclusões, visto que ele representa o número de valores a serem utilizados na interpolação por kirigagem. Maiores valores de alcance representam com mais clareza os atributos estudados.

Os semivariogramas analisados (Figura 6, 9, 10, 11, 12, 13 e 15) não indicaram preferências de direção, ou seja, não apresentaram anisotropia e a variabilidade espacial incide seguindo um mesmo padrão para todas as direções (VIEIRA, 2000). A variabilidade espacial demostra que há uma correlação entre amostras, diminuindo de acordo com o aumento da distância entre pontos amostrais (VIEIRA, 2000). Para Trangmar et al. (1985) os limites de dependência espacial entre pontos amostrais são determinados pelo alcance, seja para distâncias iguais ou menores que o alcance, afirmando então que os valores de uma variável que estão próximos possuem correlação espacial, permitindo seu uso para estimar valores a qualquer ponto em meio a eles.

Os menores alcances encontrados são justificáveis pelo fato de que no presente estudo procurou-se trabalhar com um menor espaçamento possível entre pontos e um grande número de pontos amostrais, pois se trata de uma vertente onde foi considerada a hipótese de que o fluxo de água gera condições especificas que interferem nos processo pedogenéticos, demostrando assim que a proposição de aleatoriedade dos dados foi valida. Observa-se então que o manejo, tipo de solo e declividade influenciou nos alcances, além da qualidade da distribuição das amostras em campo (COELHO et al., 2012).

A análise dos mapas de AT demonstra que as proporções deste atributo na camada de 0,00-0,10 m foi de 470 a 503 g kg^{-1} no terço médio superior e região oeste e 536 a 569 g kg^{-1} na região leste (Figura). Do terço médio ao inferior, as proporções de AT estão entre 569 a 602 g kg^{-1} na região oeste e 503 a 536 g kg^{-1} na região leste. Na profundidade de 0,10-0,20 m os valores de AT variaram de 536 a 579 g kg^{-1} partindo do terço superior na região leste até o inferior e 450 a 493 g kg^{-1} no terço médio na região oeste. Na profundidade de 0,20-0,30 m a proporção de areia média no terço superior e região leste está entre 440 a 448 g kg^{-1} e no terço superior até o médio os valores estão entre 536 a 584 g kg^{-1}. Demonstrando uma clara divisão ao longo da vertente, possibilitando a diferenciação de classes texturais e do sistema de manejo.

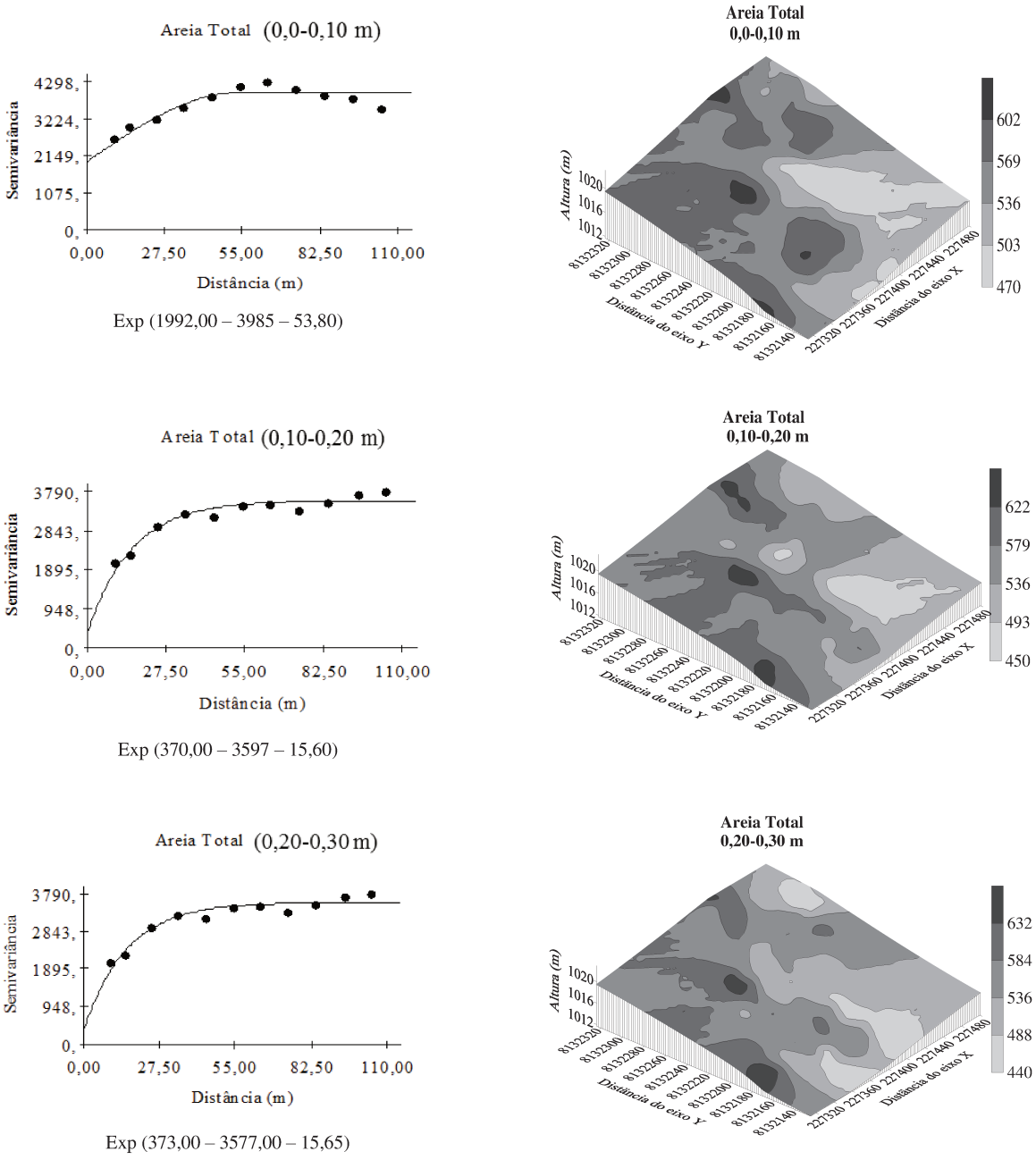


Figura 8. Semivariogramas e mapas do teor de areia total (g kg^{-1}), nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

O conteúdo de AMG e AG na profundidade de 0,0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m (Figura e 10), tem maior concentração nas partes de maior altitude do terreno, (particularmente no terço superior do terreno). Á partir dos resultados observados foi possível afirmar que o fluxo acumulado não favorece a presença de AG e AMG das profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, para terço superior e médio do terreno. Os maiores pesos das frações AG e AMG não favorecem o seu movimento a grandes distâncias, contrariamente

as frações mais finas que são arrastadas com mais facilidade pela força da água. Tal fato corrobora para a afirmação de que ocorre o transporte seletivo de partículas, regulado pela pedoforma. O transporte diferenciado das frações do solo para as partes de menor cota do terreno também foram observados por Haan et al. (1994) e Miqueloni e Bueno (2011).

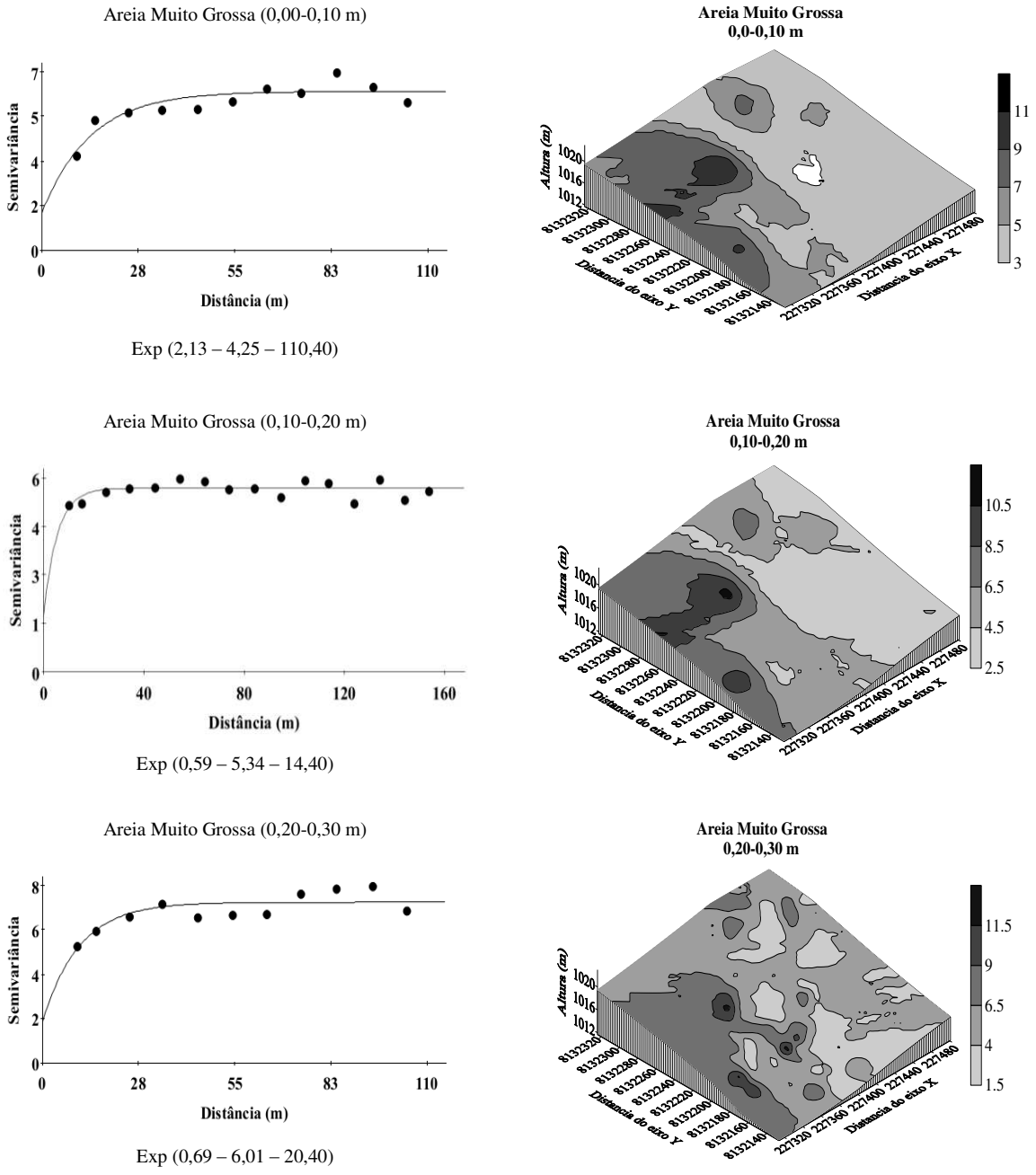


Figura 9. Semivariogramas e mapas da fração areia muito grossa (g kg^{-1}), nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

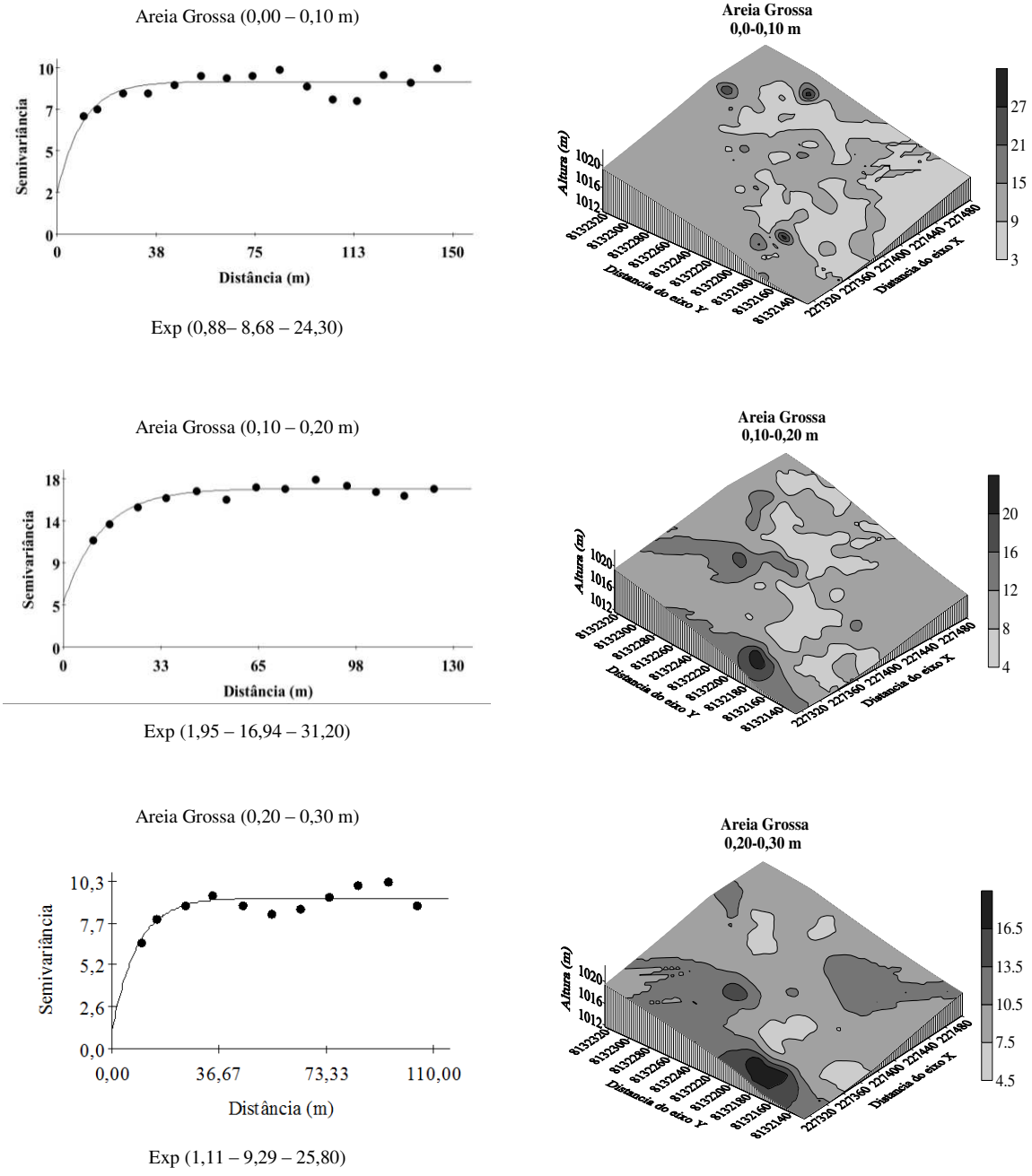


Figura 10. Semivariogramas e mapas de fração areia grossa (g kg^{-1}), nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20- 0,30 m.

O comportamento das frações granulométricas AM, AF e AMF são contrários ao de AG e AMG, porém, apresenta distribuição diferenciada nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m (Figura 11, 12 e 13). Os maiores teores de AM, AF e AMF ocorrem nas

partes do terreno de menor cota, mais precisamente na região onde há maior expressão de fluxo acumulado. Observando os resultados foi possível afirmar que o fluxo acumulado favorece a presença das frações AM, AF e AMF no terço inferior da encosta e nas zonas de maior declive nas profundidades estudadas, por conta do enriquecimento residual e transporte para a parte inferior da área estudada.

Observa-se na área uma alta variabilidade dos atributos granulométricos do solo em razão do relevo, tipo e intensidade de preparo do solo (Figura 11, 12 e 13). A forma variável do declive, da altitude e fluxo de escoamento superficial são os fatores determinantes para essa variação. Comparando os padrões de distribuição dos atributos granulométricos do solo e da declividade do terreno foi possível separar a distribuição das frações texturais em duas faixas, observando a clara divisão entre as frações mais grosseiras e as frações menores por conta da dinâmica da água no terreno. Portanto, faz-se necessário a divisão da área em diferentes segmentos de manejo do solo, por cada parte do terreno (terço superior, médio e inferior) apresentar uma taxa de produção diferente (SOUZA et al., 2004).

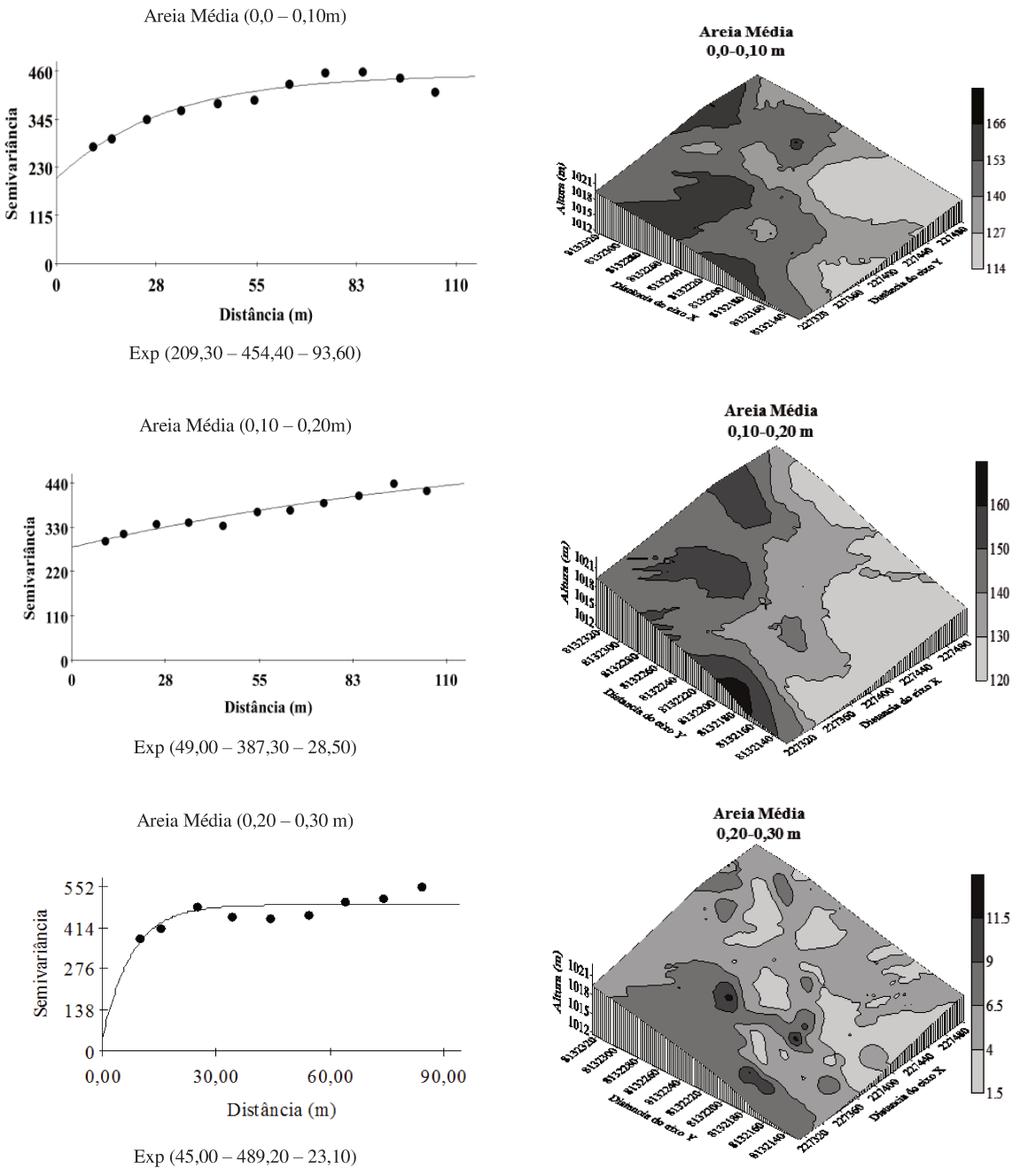


Figura 11. Semivariogramas e mapas da fração areia média (g kg^{-1}), nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

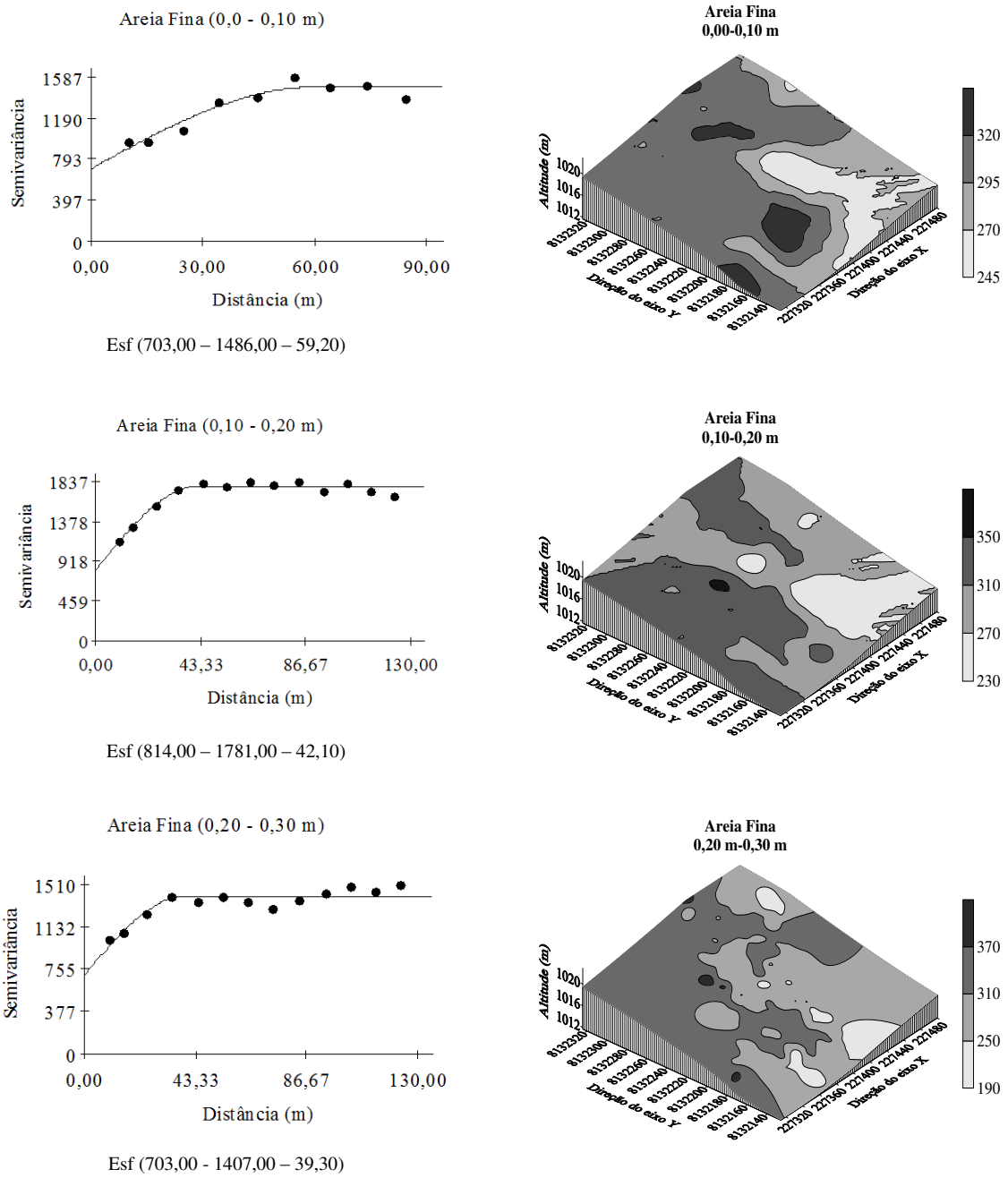


Figura 12. Semivariogramas e mapas da fração areia fina (g kg^{-1}), nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

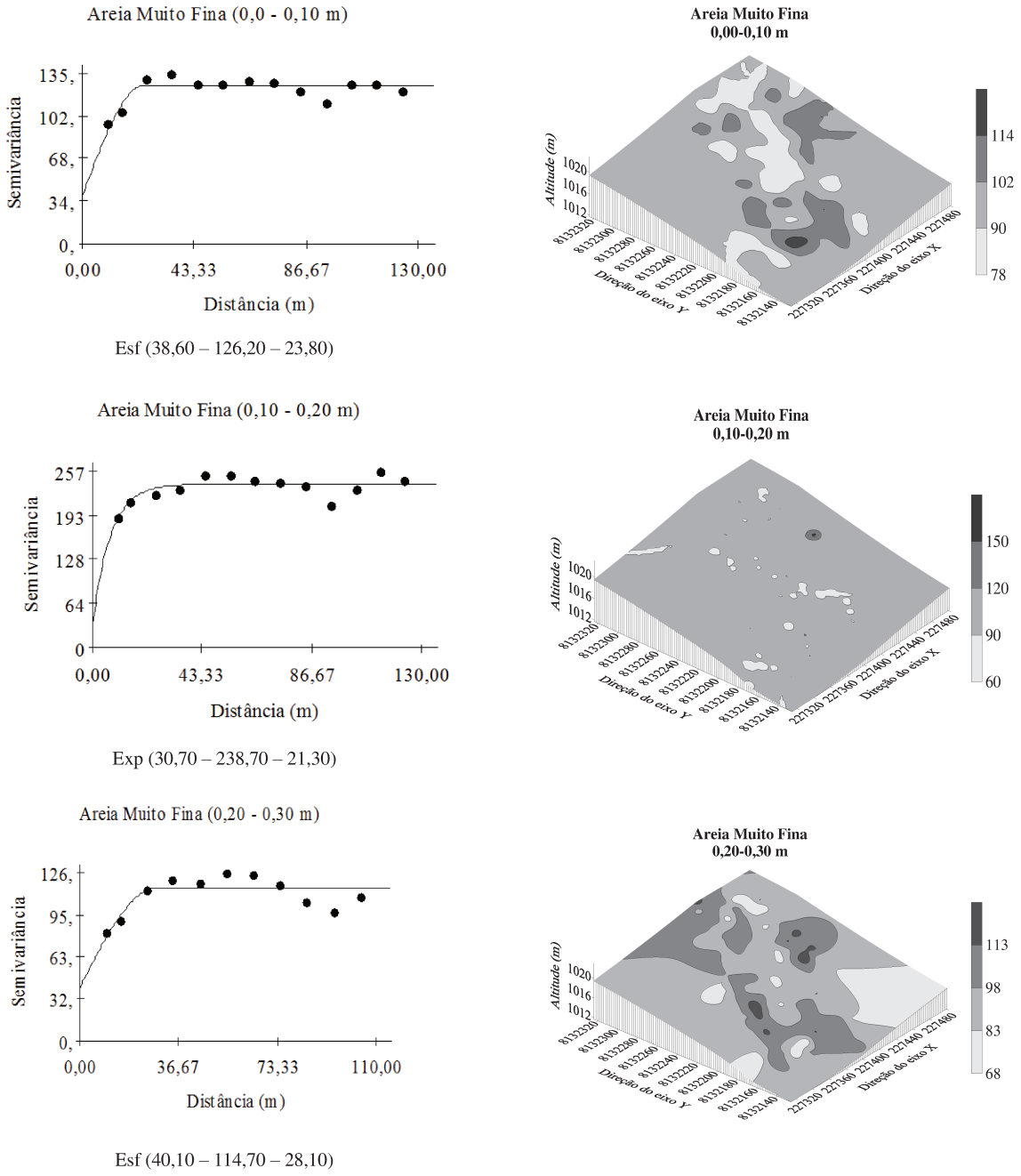


Figura 13. Semivariogramas e mapas da fração areia muito fina (g kg^{-1}), nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

A proporção da fração silte (Figura 14) na profundidade de 0,00-0,10 m, foi observada no mapa por todo o terreno estudado, sendo que nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, a proporção deste partícula foi mais aparente nas posições no terço inferior da encosta, ou seja, no final da encosta. Em estudo da relação entre as propriedades do solo e sua posição

na vertente Tsui et al. (2004) afirmam que os atributos do solo são condicionados pela pedoforma do terreno, observada a dependência espacial que pode ser influenciada pelo manejo, por conta da erosão hídrica que adiciona mais variabilidade na distribuição espacial.

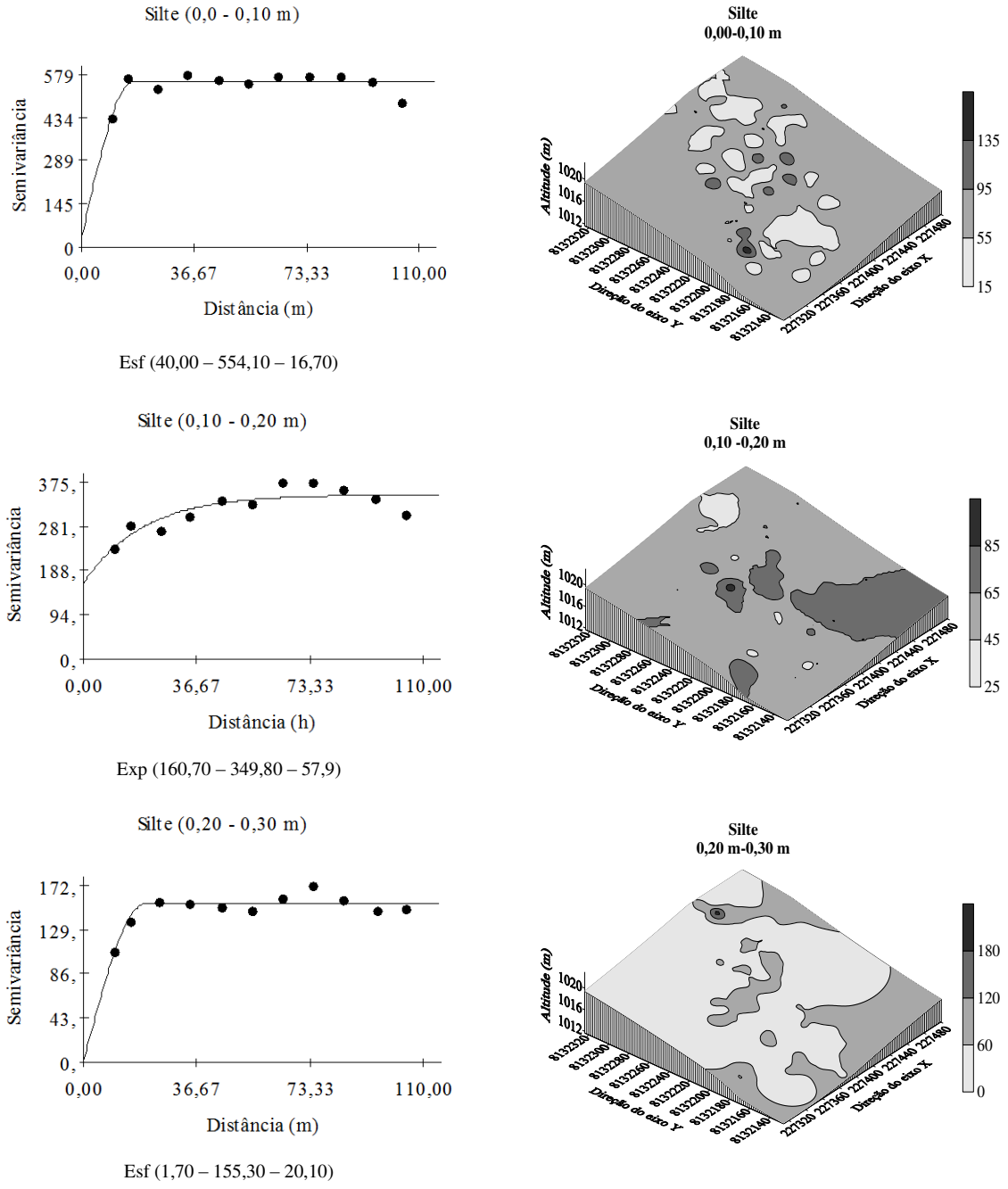


Figura 14. Semivariogramas e mapas da fração silte nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

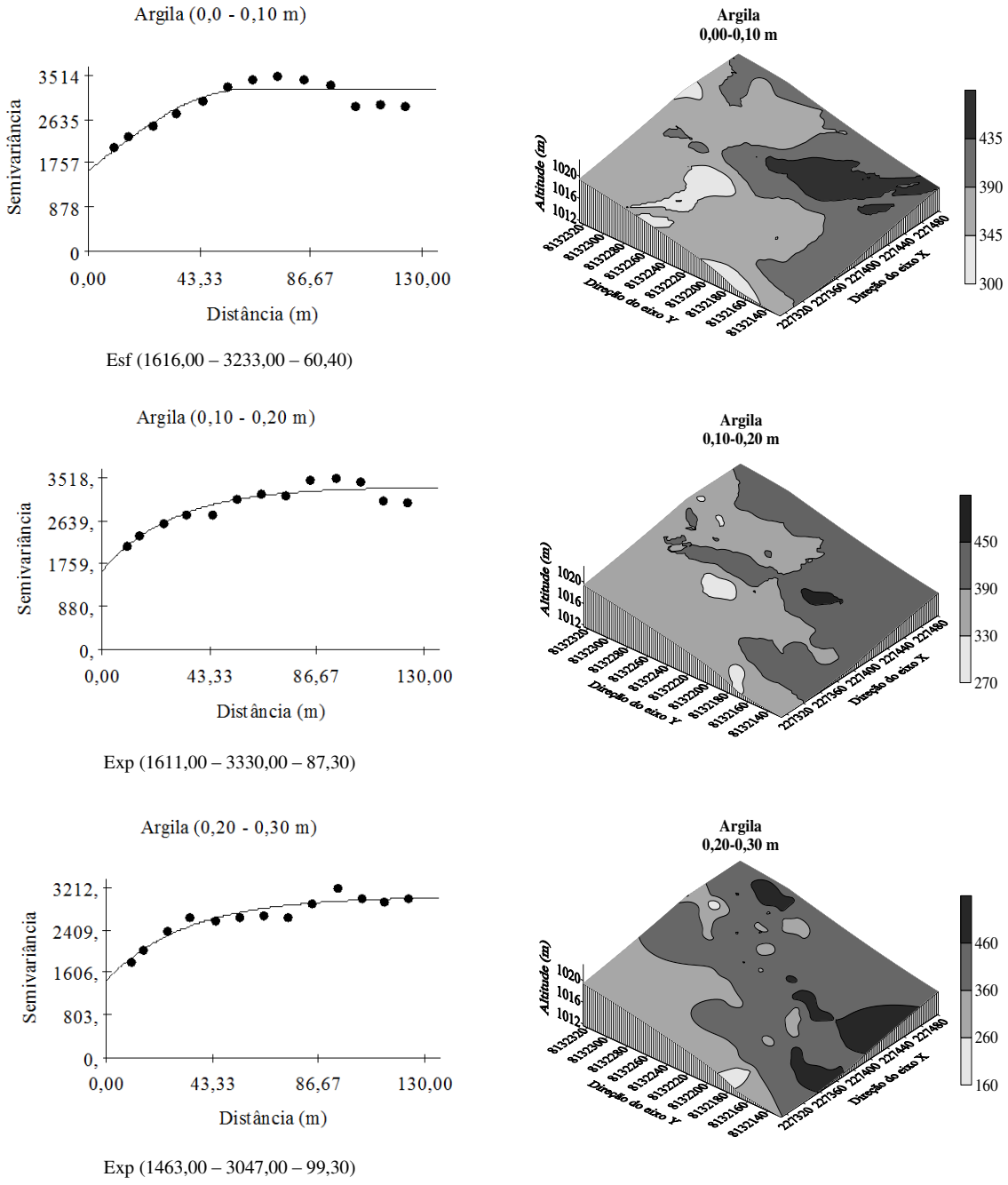


Figura 15. Semivariogramas e mapas da fração argila, nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

Para os teores de argila foi esperado um comportamento semelhante das frações AF e AMF do solo nas profundidades de 0,00-010, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, sendo que os maiores teores de argila foram observados na zona do terreno que possuem menores cotas (Figura 15).

Explicado pelo fato de que as partículas mais finas são transportadas com mais facilidade para as partes do terreno onde há incidência de maior fluxo acumulado, que para este estudo ocorreram na parte inferior do terreno, acompanhando a forma do relevo e o movimento de partículas do solo na direção perpendicular ao sentido da vertente. O comportamento dos fluxos d´agua foram investigados por Leão et al. (2010) os quais observaram que a forma côncava do terreno em estudo condiciona o movimento de partículas do solo, enquanto na faixa do terreno na posição convexa observou-se a inversão dos movimentos da massa do solo paralelamente ao sentido da vertente.

5.2. pH, Grau de floculação e grau de dispersão do solo

Avaliando os valores de delta pH do solo em cada profundidade estudada, verifica-se que estes afastam-se de zero numa escala negativa (Tabela 6). Os valores de delta pH são semelhantes em todas a vertente estudada, aumentando e diminuindo de acordo com a posição na vertente e profundidade. Os valores do grau de floculação e dispersão de argila verificado demonstram que a floculação e dispersão foram similares no solo estudado e o pH em água foi menor do que em $CaCl_2$, evidenciando predomínio de carga líquida negativa para a solução do solo, o que foi afirmado pelos valores negativos de delta pH. Estes resultados são corroborados com os encontrados por Campos et al. (2012) que também observaram predominância de carga líquida negativa no solo. Os valores negativos são resultantes do maior valor de pH e consequentemente delta pH do solo, visto que nessa condição ocorre o aumento da repulsão e favorece a dispersão de argila (AZEVEDO, 2004). Para SANCHES (1976) o delta pH para solos tropicais é comumente negativo, bem como as cargas presentes na superfície. Ainda segundo YU (1997) a predominância de carga negativa representa o domínio de argilominerais silicatados que são os principais receptores de cátions sobre cargas positivas dos hidróxidos de Fe e Al.

Tabela 6. Análise descritiva para os atributos grau de floculação da argila-GFA (g kg^{-1}), grau de dispersão da argila-GDA (g kg^{-1}) e delta pH (ΔpH) nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m e na estratificação do terreno (terço inferior, médio e superior da encosta)

Variável	Prof. (m)	[1]Média	Mediana	[2]CV	Assimetria	Curtose
		----------Terço inferior da encosta----------				
GFA	0,0-0,1	56,48 a	56,92	10,85	-0,17	-0,50
	0,1-0,2	53,32 a	52,59	13,18	-0,62	1,58
	0,2-0,3	52,24 b	52,86	14,17	-1,10	2,88
GDA	0,0-0,1	43,55 b	43,07	14,06	0,17	-0,50
	0,1-0,2	46,67 a	47,40	15,06	0,62	1,58
	0,2-0,3	47,75 a	47,13	15,50	1,10	2,88
ΔpH	0,0-0,1	-0,71 a	-0,71	-58,79	-0,12	-0,56
	0,1-0,2	-0,72 a	-0,75	-61,48	0,24	-0,22
	0,2-0,3	-0,75 a	-0,77	-53,06	0,01	-0,06
		----------Terço médio da encosta----------				
GFA	0,0-0,1	56,21 a	57,50	12,04	-0,30	3,26
	0,1-0,2	51,83 b	52,00	9.89	0,87	1,37
	0,2-0,3	52,24 b	52,86	14,17	-1,10	2,88
GDA	0,0-0,1	43,78 b	42,49	15,45	0,30	3,26
	0,1-0,2	47,99 a	47,76	10,61	0,87	1,37
	0,2-0,3	47,75 a	47,13	15,50	1,10	2,88
ΔpH	0,0-0,1	-0,58 a	-0,47	-133,69	-3,38	15,92
	0,1-0,2	-0,47 a	-0,34	-145,9	-2,13	5,26
	0,2-0,3	-0,45 a	-0,4	-143,16	-2,58	8,10
		----------Terço superior da encosta----------				
GFA	0,0-0,1	54,20 a	55,98	17,40	-1,53	4,59
	0,1-0,2	52,96 b	53,37	14,44	-0,08	-0,39
	0,2-0,3	49,20 b	48,00	16,22	3,31	17,93
GDA	0,0-0,1	45,79 a	44,01	20,60	1,53	4,59
	0,1-0,2	47,03 a	46,62	16,26	0,08	-0,39
	0,2-0,3	47,24 a	44,00	13,08	-0,07	-0,45
ΔpH	0,0-0,1	-0,69 a	-0,64	-49,00	-0,60	-0,50
	0,1-0,2	-0,69 a	-0,67	-0,76	2,01	10,38
	0,2-0,3	-0,76 a	-0,70	-54,80	-0,43	-0,33

[1]Médias seguidas pela das mesmas letras na linhas não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey; [2]CV = Coeficiente de Variação.

O teste de média mostra que nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, o grau de dispersão de argila e grau de floculação foi menor no terço inferior da encosta

comparada o terço superior e médio da encosta (Tabela 6). Evidenciando que a floculação e dispersão do solo são mais pronunciadas nas faixas do terreno de maior altitude, comprovando que o material disperso nas faixas de maior altitude do terreno segue o fluxo acumulado na vertente, podendo indicar uma maior movimentação da argila no perfil desse solo.

A elevada dispersão de argila no solo em estudo contribuiu para o rearranjamento de partículas no solo (Tabela 6). Segundo a Embrapa (2007) pode promover a eluviação de argila nas camadas subsuperficiais, expressivamente sob condições de chuva ou irrigação (HELALIA et al., 1998; APOLINO et al., 2006) e então promover o adensamento dessas faixas do solo (SILVA et al., 1998).

Os resultados indicam os picos dos teores de argila dispersa na área estudada encontram-se distribuídos no terço médio superior da encosta nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m (Tabela 6). Provavelmente, a ocorrência de tal fato foi devido à fertirrigação, visto que a qualidade da água de irrigação e condutividade elétrica não apresentaram níveis prejudiciais. Concordando com Castanheira et al. (2010) os autores chegaram a conclusão que que o fertilizante aplicado contribuiu para a salinização da solução do solo, quando a água de irrigação apresentava baixos níveis de sais. Em se tratando de um solo irrigado por pivô central é valido ressaltar que a aplicação de água de irrigação ao solo promove alterações as quais são relacionadas aos atributos químicos do solo, como pH e concentração do tipo de íons no solo. Dantas et al. (2012) comparam o grau de dispersão de argila em um solo irrigado por pivô central sob cultivo anual e cultivo perene e, observaram que houve maior dispersão de argila quando o solo foi submetido ao cultivo anual. De acordo com Apolino et al. (2006) ocorrendo a variação de pH no solo a concentração crítica da floculação de argila também foi alterada causando a dispersão da fração argila. Além disso, o emprego de irrigação por pivô central em área sem a presença de cobertura do solo beneficia o impacto de gotas d´água na superfície do solo, atribuindo um aumento na quebra de agregados superficiais e argila dispersa (DANTAS et al., 2012; BIELDERZ; RIMONPHES, 2010).

Os valores do coeficiente de variação referentes ao grau de floculação e dispersão do solo demonstram que na profundidade de 0,00-0,10 m (Tabela 6), no terço inferior e médio o CV foi baixo, segundo o critério de Warrick e Nielsen (1980). Cajazeira e Assis Júnior (2011) encontraram um CV baixo para essas variáveis trabalhando em um Argissolo no Ceará. No terço superior o CV foi médio. Na profundidade de 0,10-0,20 m, o CV foi médio no terço

médio e superior, baixo no intermediário e na profundidade de 0,20-0,30 m o CV foi médio em todos os compartimentos do terreno.

Quanto aos alcances para o GFS e GDS, observa-se que os alcances obtidos foram baixos na profundidade de 0,0-0,10 m, 10,22 m e 14,00 m, respectivamente, na profundidade de 0,10-0,20 m foi de 42,00 m e 41,00 m e na profundidade de 0,20-0,30 m, foi de 14,70 m e 13,50 m (Tabela 7). Para as varáveis GDA na profundidade de 0,00-0,10 m e delta pH nas três profundidades estudadas o modelo que melhor se ajustou foi o esférico, concordando com os dados obtidos por Carvalho et al. (2003) e Cajazeira e Assis Júnior (2011) que também encontraram o melhor ajuste para esse modelo estudando a estrutura espacial de atributos do solo.

Quanto aos modelos para definição dos parâmetros do semivariograma, as variáveis GDA na profundidade de 0,00-0,10 m e delta pH nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, se ajustaram ao modelo esférico (Tabela 6). Estando de acordo com Cajazeira e Assis Júnior (2011) trabalhando com Argissolo. A variáveis GFA na profundidade de 0,00-0,10 m, melhor se ajustou ao modelo gaussiano e as variáveis GDA e GFA nas profundidades de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, obtiveram melhor ajuste ao modelo exponencial.

Tabela 7. Parâmetros dos semivariogramas ajustados aos atributos grau de floculação da argila-GFA (g kg^{-1}), grau de dispersão da argila-GDA (g kg^{-1}) e delta pH (ΔpH) nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

Variável	Prof. (m)	Modelo[5]	[1]C_0	Patamar	[2]C_0/C_0+C_1	[3]R^2	Alcance	[4]PV^1
GFA	0,0-0,1	Gaus	7,20	47,46	0,848	0,92	10,21	<0,0100
	0,1-0,2	Exp	19,35	39,71	0,50	0,85	42,00	<0,0100
	0,2-0,3	Exp	6,70	54,58	0,87	0,84	14,70	<0,0100
GDA	0,0-0,1	Esf	1,71	26,48	0,93	0,04	12,20	0,1397
	0,1-0,2	Exp	19,74	39,49	0,50	0,90	41,40	<0,0100
	0,2-0,3	Exp	1,80	53,49	0,89	0,68	13,50	<0,0100
ΔpH	0,0-0,1	Esf	0,10	0,21	0,50	0,93	47,50	0,1137
	0,1-0,2	Esf	0,12	0,25	0,50	0,96	43,80	0,0871
	0,2-0,3	Esf	0,09	0,22	0,59	0,88	51,60	0,0871

[1]C_0 = Efeito Pepita; [2]C_0/C_0+C_1 = Grau de dependência espacial; [3]R^2 = Coeficiente de determinação; [4]PV^1 = Teste de Komogorov Smirnov; [5]EXP = exponencial, ESF = esférico e GAUS = gaussiano.

Na análise dos mapas de delta pH foi observado que os maiores valores se concentram na terço superior do terreno, coincidentemente onde se concentra os maiores valores de GDA do solo (Figura 18, 17 e 18), evidenciando que a carga líquida negativa dos colóides foi mais expressiva na parte do terreno onde ocorre o fluxo acumulado de água, promovendo a migração de partículas do solo para as escalas do terreno de menor declividade. Provavelmente ocorreu uma mudança nos tipo de íons do solo, uma vez que os elementos Ca e Al são cátions floculantes e, o primeiro pode se manifestar no solo por conta de uma calagem superficial, observado que a concentração de Ca se dá na aplicação de calcário na superfície do solo afetando as propriedades eletroquímicas e físicas do solo, designadamente no sistema de plantio direto, pois a aplicação superficial resulta na concentração de calcário na superfície do solo (COSTA et al., 2004), ou pela manifestação de Al trocável, ou ainda da concentração de sódio que é um cátion dispersante, e pode estar presente em elevados níveis na água de irrigação.

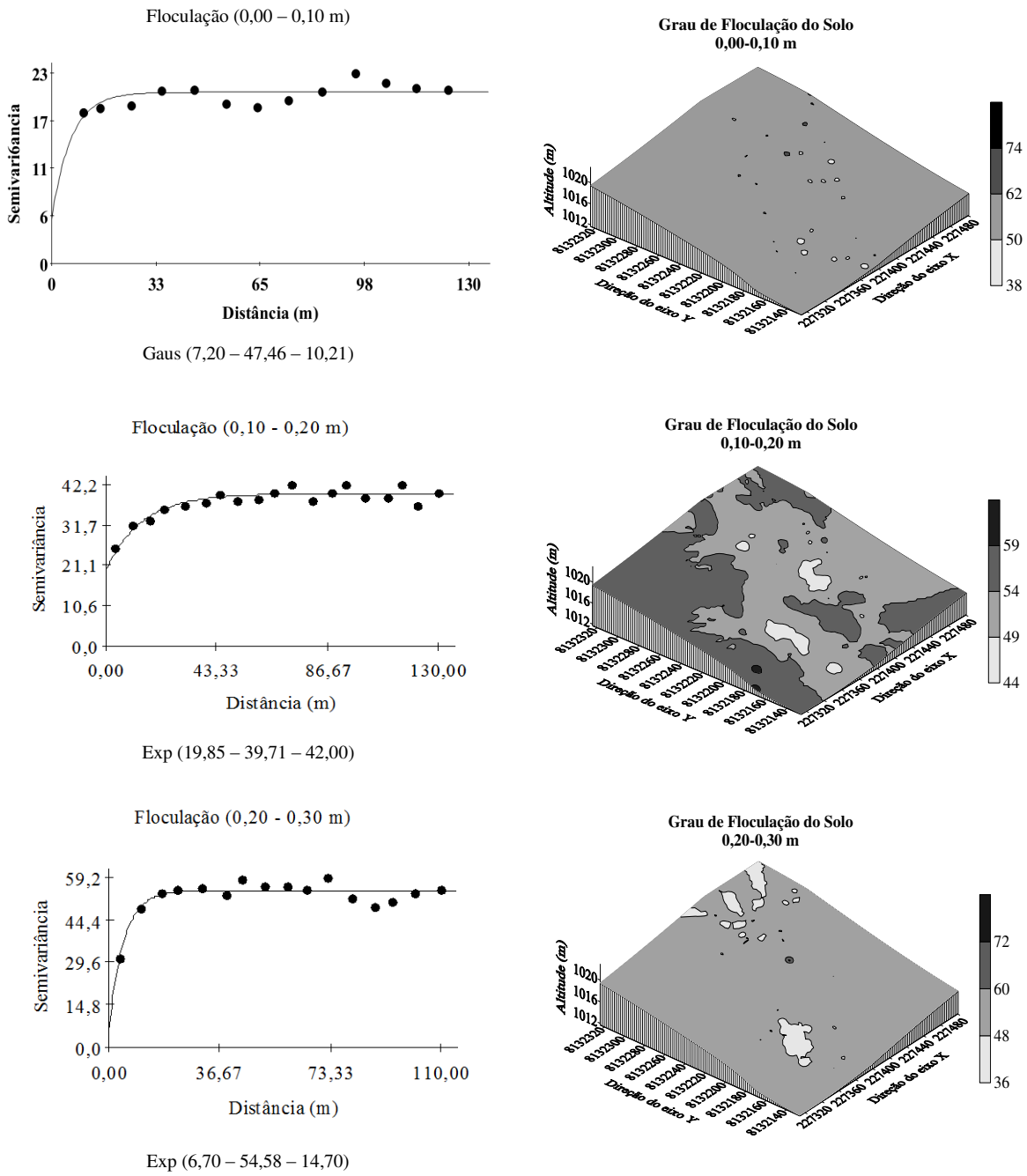


Figura 16. Semivariogramas e mapas do grau de floculação da argila (g kg^{-1}), nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

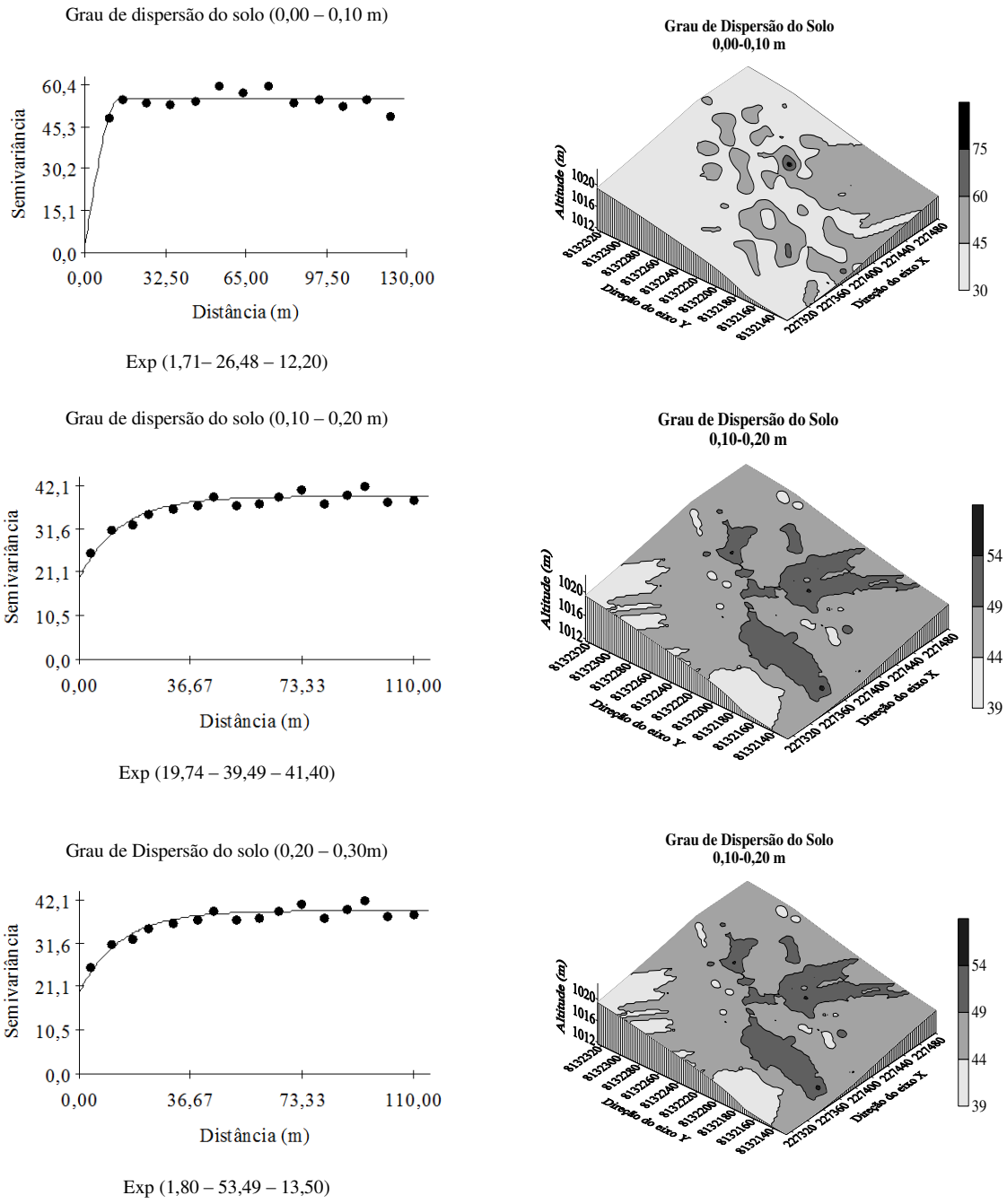


Figura 17. Semivariogramas e mapas do grau de dispersão do solo (g kg^{-1}), nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

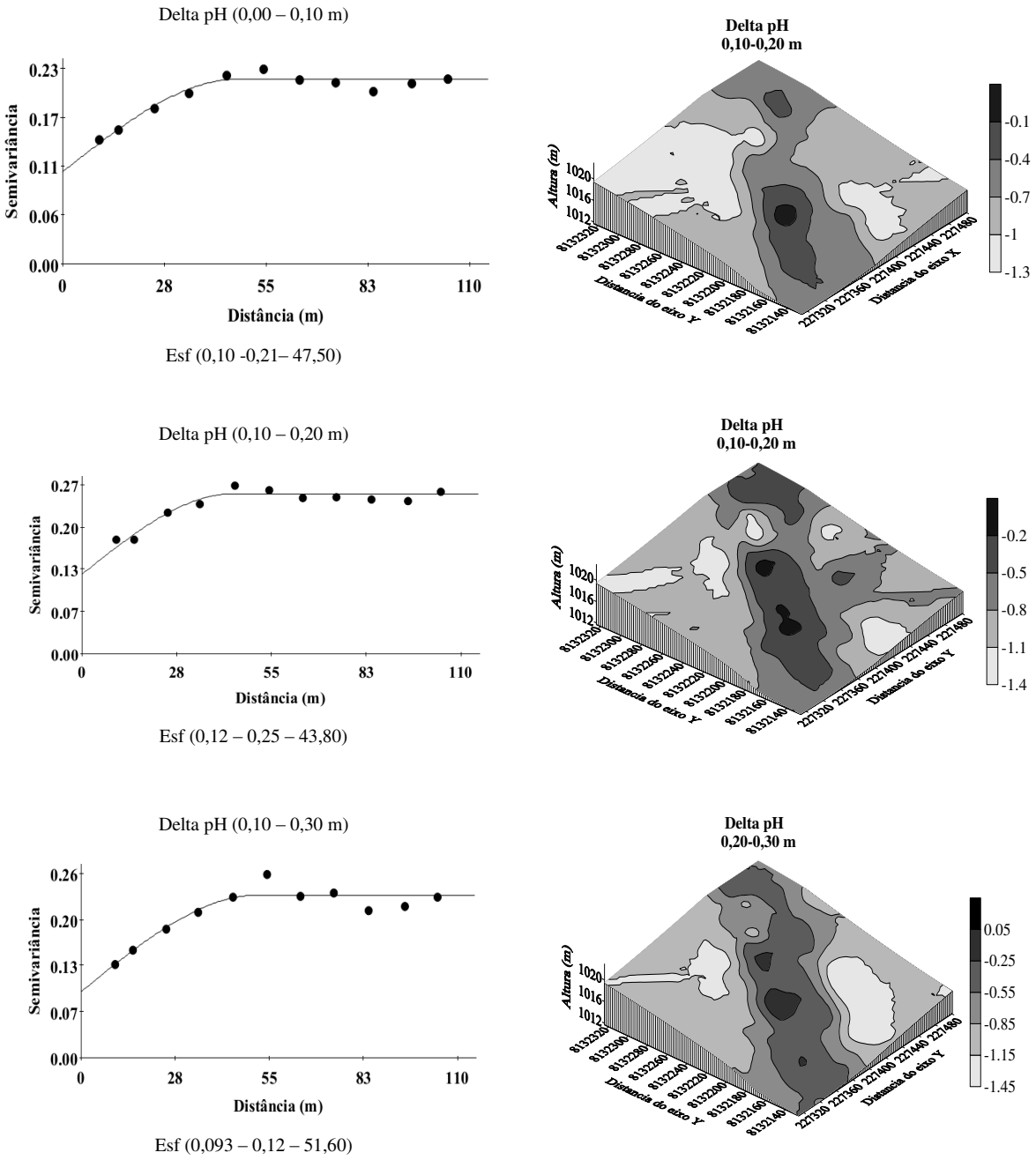


Figura 18. Semivariogramas e mapas do atributo delta pH, nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

5.3. Agregados do solo, limite de liquidez e plasticidade

Na distribuição dos agregados do solo estáveis em água, a classe predominante foi a de 1,15 a 1,29 mm (Tabela 8). Os menores valores dessa classe influenciaram os baixos

valores observados para o diâmetro médio geométrico (DMG) e diâmetro médio ponderado (DMP), discordando de Stone et al. (2013) que correlacionando a produtividade do feijoeiro em sistema de cultivo orgânico e os atributos do solo em Latossolo Vermelho distrófico, os quais encontraram valores médios para DMP de 5,75 mm, em razão do elevado teor de matéria orgânica nesse solo que favorece a atividade microbiana conferindo maior agregação.

O teste de Komogorov-Smirnov indicou normalidade para as variáveis DMP, DMG e LL em todas as profundidades avaliadas (Tabela 9). Os valores da média e mediana são próximos para as variáveis em estudo, apresentando uma distribuição simétrica, corroborando com Silva et al. (2009) que encontraram normalidade para os atributos físicos do solo trabalhando com latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. Para Little e Hills (1978) valores próximos de média, mediana e moda são um indicativo de normalidade, descartando a ocorrência de outliers na distribuição dos dados (CAMBARDELA et al., 1994), demonstrando que os dados podem ser utilizados na análise geoestatística.

Tabela 8. Análise descritiva para os atributos diâmetro médio geométrico-DMG (mm), diâmetro médio ponderado-DMP (mm) e limite de liquidez-LL (wl) nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m e na estratificação do terreno (terço inferior, médio e superior da encosta).

Variável	Prof. (m)	[1]Média	Mediana	[2]CV	Assimetria	Curtose
		----------Terço inferior da encosta----------				
DMG	0,0-0,1	1,28 a	1,18	23,34	1,53	1,59
	0,1-0,2	1,32 a	1,19	26,45	2,37	6,57
	0,2-0,3	1,29 a	1,14	28,83	1,87	3,10
DMP	0,0-0,1	1,82 a	1,75	34,47	0,24	-0,24
	0,1-0,2	1,54 a	1,51	37,01	1,05	4,10
	0,2-0,3	1,69 a	1,92	37,28	0,50	1,47
LL	0,0-0,1	1362,28 a	1362,5	1,56	-0,12	-0,63
	0,1-0,2	1351,55 a	1358,00	2,00	-0,083	-1,33
	0,2-0,3	1366,78 a	1366,00	1,42	0,013	-1,19
		----------Terço médio da encosta----------				
DMG	0,0-0,1	1,26 a	1,24	11,97	0,30	-0,93
	0,1-0,2	1,23 a	1,16	17,23	0,84	-0,37
	0,2-0,3	1,15 a	1,11	12,32	1,03	0,50
DMP	0,0-0,1	1,76 a	1,61	30,79	-0,19	-0,60
	0,1-0,2	1,66 a	1,70	21,89	-0,10	-0,22
	0,2-0,3	1,76 a	1,81	26,07	0,19	0,12
LL	0,0-0,1	1364,28 a	1364,5	1,56	-0,12	-063
	0,1-0,2	1354,21 a	1360,83	2,04	-0,089	-1,36
	0,2-0,3	1368,32 a	1367,5	1,41	0,03	-1,16
		----------Terço superior da encosta----------				
DMG	0,0-0,1	1,78 a	1,64	24,00	0,68	-0,31
	0,1-0,2	1,21 b	1,13	18,33	1,62	3,12
	0,2-0,3	1,24 b	1,16	0,16	0,95	-0,19
DMP	0,0-0,1	1,17 a	1,12	0,14	1,90	5,26
	0,1-0,2	1,55 a	1,52	23,85	-0,43	1,18
	0,2-0,3	1,69 a	1,59	28,98	0,60	0,22
LL	0,0-0,1	1363,28 a	1363,5	1,56	-0,12	-0,63
	0,1-0,2	1353,21 a	1359,83	2,04	-0,08	-1,36
	0,2-0,3	1367,32 a	1366,5	1,41	0,03	-1,16

[1]Médias seguidas pela das mesmas letras na linhas não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey; [2]CV = Coeficiente de Variação.

Tabela 9. Parâmetros dos semivariogramas ajustados para os atributos diâmetro médio geométrico-DMG (mm), diâmetro médio ponderado-DMP (mm) e limite de liquidez-LL (ws) nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

Variável	Prof. (m)	Modelo[5]	[1]C_0	Patamar	[2]C_0/C_0+C_1	[3]R^2	Alcance	[4]PV^1
DMG	0,0-0,1	Exp	0,00	0,03	0,85	0,67	22,20	<0,0100
	0,1-0,2	Exp	0,00	0,06	0,87	0,84	31,50	<0,0100
	0,2-0,3	Exp	0,00	0,02	0,86	0,82	22,50	<0,0100
DMP	0,0-0,1	Exp	0,02	0,25	0,89	0,71	17,70	<0,0100
	0,1-0,2	Exp	0,01	0,14	0,89	0,74	21,00	0,0768
	0,2-0,3	Exp	0,07	0,25	0,72	0,88	46,50	>0,1500
LL	0,0-0,1	Esf	92,00	426,60	0,78	0,73	21,00	<0,0100
	0,1-0,2	Esf	111,00	533,70	0,79	0,83	22,40	<0,0100
	0,2-0,3	Esf	120,00	561,80	0,78	0,87	23,20	<0,0100

[1]C_0 = Efeito Pepita; [2]C_0/C_0+C_1 = Grau de dependência espacial; [3]R^2 = Coeficiente de determinação; [4]PV^1 = Teste de Komogorov Smirnov; [5]EXP = exponencial, ESF = esférico e GAUS = gaussiano.

Nenhum valor de diâmetro médio geométrico (DMG) excedeu a 2,0 mm, evidenciando uma baixa estabilidade de agregados neste solo com uma alta proporção de areia (Tabela 9), concordando com os resultados obtidos por Tavares Filho et al. (2010) que trabalharam com Latossolo Vermelho distrófico. Para Hickman et al. (2011) o valor de DMP aumenta de acordo com a classe de agregados que apresentam maior tamanho, enquanto o índice DMG foi uma estimativa das classes de agregados de maior expressão.

Na camada de 0,00-0,10 m, o DMP diminui de acordo com a posição no terreno uma vez que o maior valor foi observado no terço inferior, diminuindo nas posições terço médio e superior (Tabela 8). Isso pode ser explicado pela ação de revolvimento do solo superficial, provocando a quebra de macroagregados do solo, também o impacto das gotas d´agua no solo que promove a desagregação na superfície, ou ainda por estar ligado a partículas mais finas do solo como a argila que exerce a função de um agente cimentante. Resultados semelhantes foi observado por Dantas et al. (2012) que obtiveram menor valor de DMP na profundidade superficial do solo. A diminuição nos valores de DMP do solo na camada superficial pode ser atribuída ao GFA, o que foi observado em toda a vertente na profundidade de 0,00-0,10 m, provavelmente pelo efeito da calagem na superfície do solo que aumentou o GFA do solo, ocorrendo a quebra de agregados por conta da falta de agentes ligantes, ou seja, a argila que foi carreada as partes de menor declive do terreno.

Observa-se também que a partir de um determinado teor de água, dependendo do teor de argila e tipo de solo a amplitude dos valores de umidade ótima para compactação são baixos, por não levar em conta nenhuma variável característica da estrutura em que o solo se encontra, a água presente no solo foi condicionada pela estrutura do solo (Figura 19).

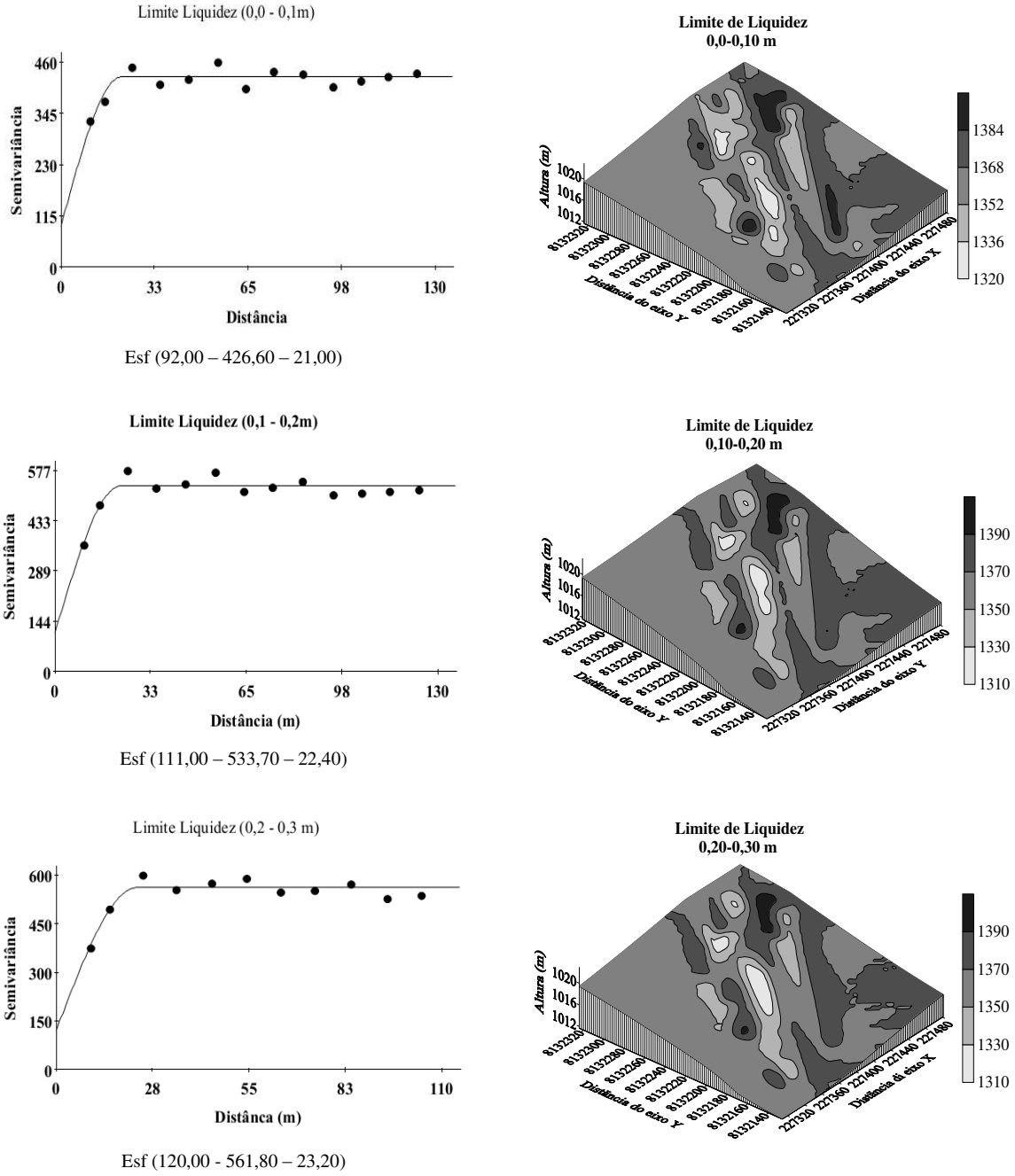


Figura 19. Semivariogramas e mapas do limite de liquidez do solo (ws), nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

Assim o DMP do solo pode ser correlacionado com o LL para identificar se há acumulação de argila em determinadas zonas do terreno fazendo com que o LL do solo seja e modificado (Tabelas 6, 7 e 8) Ainda sim, a existência dessas zonas de acúmulo favorecem a quebra da estrutura do solo pela maior retenção de água e alteração do estado de friabilidade do solo, quando para operações de manejo.

Não foi observada uma relação entre o limite de liquidez e plasticidade do solo com o DMP desse solo, caracterizado como de baixa plasticidade nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m para as terço inferior, médio e superior da encosta, pois esse não apresentou diferença significativa quando comparadas as posições e profundidades pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade no terreno estudado, podendo ser explicado pelo teor de água no solo que variou entre 15,58 e 18,50 kg kg^{-1} (Tabela 8). Contrariamente Milde et al. (2008), relacionando o DMP do solo para estimar as propriedades físico-hídricas do solo de 13 classes de solo, obtiveram uma alta correlação entre o limite de liquidez e plasticidade do solo e o DMP em estudo.

Quanto ao DMP na profundidade de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, o comportamento foi contrário a profundidade de 0,00-0,10 m, os valores de DMP aumentam de acordo com a profundidade no terço inferior da encosta, médio e superior do terreno (Tabela 8). Podendo ser explicado pela estabilização de agregados por partículas minerais, no caso silte e argila por conta da pressão exercida pelo conjunto de rodado de máquinas e implementos, ajustando o arranjo destas partículas em complexos minerais mais estáveis. LIMA et al. (2006), observaram a ocorrência desse fenômeno no solo nas camadas mais profundas (0,10-0,30 m).

Os parâmetros estatísticos dos atributos DMP e DMG do solo revelam que há variabilidade em todas as profundidades analisadas (Tabela 8), segundo o critério de Warrick e Nielsen (1980), visto que o CV na profundidade de 0,00-0,10 m foi alto para DMP nas três profundidades estudadas (34,47%) , (30,79%), (24,00%) respectivamente. Os valores de CV para o DMG se mostram baixos em todas os declives do terreno de 23,34, 11,97 e 1,14% para terço inferior, médio e superior, respectivamente. Na profundidade de 0,10-0,20 m, os valores de CV para o DMP no terço superior foi de 37,01% (alto), no terço médio foi de 21,89% (médio) e na terço inferior de 23,85% (médio). Os valores de CV para DMG foi alto no terço superior (37,01%) e médio no terço intermediário da encosta (17,23%). Quanto ao CV do LL, obteve valores baixos em todas as profundidades e compartimentos do terreno estudado.

Quanto aos alcances, foram considerados médio para DMP e DMG (Tabela 9). Camargo et al. (2010) estudaram a estrutura espacial de um argissolo sob diferentes curvaturas em uma vertente e encontraram alcances elevados para os atributos DMP e DMG. O modelo que melhor se ajustou foi o exponencial para os atributos DMP e DMG nas três profundidades estudadas, concordando com os trabalhos de Salviano et al. (1998) e Vieira et al. (2011).

Observa-se por meio da análise do mapa de DMP para a profundidade de 0,00-0,10 m que a classe dominante foi de 1,80 mm no terço superior, médio e inferior da encosta, nota-se que esse valor foi observado no sentido do fluxo acumulado de água na área até o sentido do terço inferior da encosta (Figura 20 e 21). O mesmo comportamento foi observado na profundidade de 0,10-0,20 m, podendo ser explicado pelo movimento da fração argila no solo, o alto grau de dispersão de argila desse solo que provocou a desestabilização e quebra de macroagregados os quais são transportados pela água da chuva ou irrigação (HELALIA et al., 1998). Verifica-se a diminuição do DMP coincidentemente onde predominam os maiores valores de carga líquida negativa do solo (Figura 19) e GDA do solo (Figura 18), o incremento da GDA do solo nessa profundidade pode ser devido provavelmente, pela predominância de carga líquida negativa diminuição de cargas positivas e aumento das negativas, evidenciado na avaliação do delta pH.

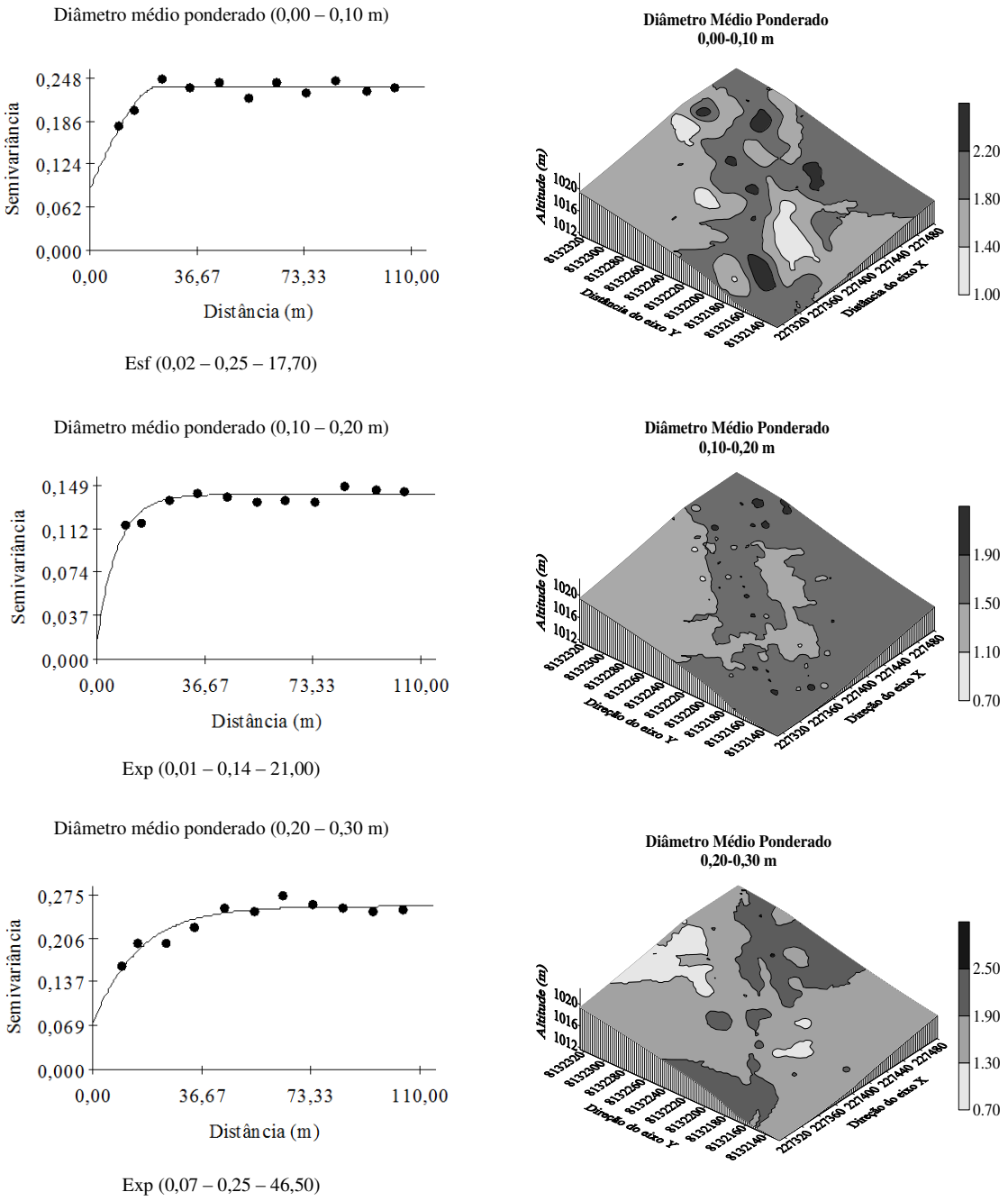


Figura 20. Semivariogramas e mapas do diâmetro médio ponderado-DMP (mm), nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, respectivamente, de acordo com a estratificação do terreno.

Na profundidade de 0,20-0,30 m, a classe de maior expressão no mapa foi a de 1,30 a 1,90 mm, porém, está presente na vertente no terço superior, médio e inferior da encosta (Tabela 8). Confirmando que há o ajuste desses agregados em complexos minerais mais

estáveis, por conta da pressão exercida pelo conjunto rodado de pneus em todas as ações de manejo aplicadas (AZEVEDO; BONUMÁ, 2004).

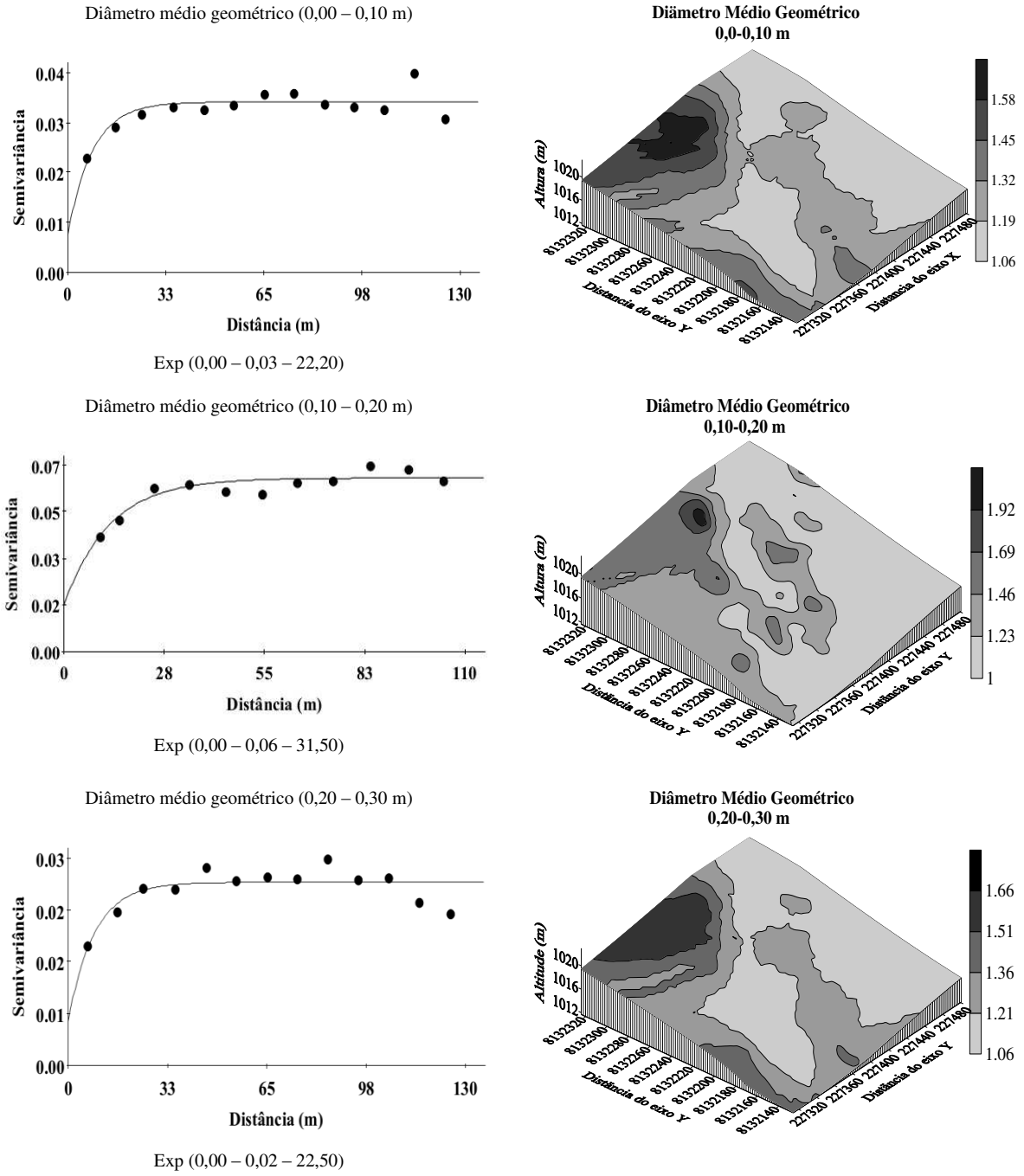


Figura 21. Semivariogramas e mapas do diâmetro médio geométrico-DMG (mm), nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

5.4. Análise exploratória dos dados de densidade do solo, porosidade do solo, resistência do solo à penetração, teor de água no solo, massa de raízes e produtividade do feijoeiro

Os resultados referentes à estatística descritiva revelaram normalidade dos dados das variáveis densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, resistência do solo à penetração (Tabela 10), massa de raízes e produtividade (Tabela 11), concordando com os resultados obtidos por Santos et al. (2012) que também encontraram normalidade para essas variáveis trabalhando com um Latossolo Vermelho após cultivo de soja.

Os dados de DS, macroporosidade, microporosidade, porosidade total demonstram que há variabilidade espacial dos dados tendo em vista coeficiente de variação (Tabela 12). O CV de DS na profundidade de 0,00-0,10 m, está entre 10,10 a 33,78%, que segundo o critério de Warrick e Nielsen (1980) correspondem a CV baixo e alto, respectivamente. Na profundidade de 0,10-0,20 m, o CV da DS variou de 8,16 a 11,26% considerado baixo (>12%). Na profundidade de 0,20-0,30 m variou de 10,75 a 21,83% (baixo, <12%) e alto (>24%). Na profundidade de 0,20-0,30 m os valores de CV para DS foram de 10,75% (baixo), 13,22% (médio) e 21,83% (médio), respectivamente. As médias obtidas para RP variaram entre baixo e médio nas profundidades de 0,0-0,10 e 0,20-0,30 m, enquanto na profundidade de 0,10-0,20 m, os valores foram altos. A umidade do solo apresentou CV médio para todas as profundidades e posições do terreno analisadas.

O uso rotineiro do solo é uma atividade inevitável em áreas irrigadas, tal particularidade atribuiu alterações na porosidade do solo ao longo do seu perfil (Tabela 10). Os valores de macroporosidade e porosidade total na profundidade de 0,00-0,10 m, se mostram inferiores aos valores das profundidades de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, quando confrontados estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%. Os dados estão de acordo com os obtidos por Michelon et al. (2009) que trabalharam com vários solos sob pivô central e observaram os menores valores de macroporosidade e porosidade total na camada superficial do solo. A explicação para este resultado está no revolvimento superficial, particularidade do plantio direto, que reduziu a densidade e aumentou a microporosidade na camada superficial do solo. É valido lembrar que o preparo do solo no sistema de plantio direto provoca a desagregação da camada superficial e pode atribuir a compactação ao solo nessa faixa, inferindo no aumento da densidade e da microporosidade e diminuindo a macroporosidade e porosidade total.

Tabela 10. Análise descritiva para os atributos densidade do solo-DS (kg dm^{-3}), macroporosidade (m^3 m^{-3}), microporosidade (m^3 m^{-3}), porosidade total-PT (m^3 m^{-3}) e resistência do solo à penetração-RP (MPa) nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m e na estratificação do terreno (terço inferior, médio e superior da encosta).

Variável	Prof. (m)	[1]Média	Mediana	[2]CV	Assimetria	Curtose
		----------Terço inferior da encosta----------				
DS	0,0-0,1	1,30 a	1,30	10,10	-0,15	-0,92
	0,1-0,2	1,36 b	1,37	11,26	-0,64	-0,12
	0,2-0,3	1,36 b	1,37	10,75	-0,52	-0,06
Macroporosidade	0,0-0,1	0,19 a	0,19	0,12	0,00	0,58
	0,1-0,2	0,20 a	0,19	14,93	0,92	0,15
	0,2-0,3	0,20 a	0,20	15,34	0,85	0,94
Microporosidade	0,0-0,1	0,29 a	0,30	17,86	0,04	-1,07
	0,1-0,2	0,26 b	0,27	11,53	-0,95	3,11
	0,2-0,3	0,26 b	0,27	0,13	-0,02	-1,30
PT	0,0-0,1	0,48 a	1,16	16,73	0,95	-0,20
	0,1-0,2	0,46 a	0,47	6,90	0,02	0,05
	0,2-0,3	0,47 a	0,46	10,12	0,09	0,07
RP	0,0-0,1	3,73 b	3,31	41,48	1,44	1,89
	0,1-0,2	3,01 b	2,62	36,97	0,84	0,78
	0,2-0,3	150,5 a	150,5	11,60	3,11	-1,2
Umidade	0,0-0,1	17,31 a	18,04	24,99	0,14	1,92
	0,1-0,2	15,58 a	16,52	33,56	0,25	0,50
	0,2-0,3	15,81 a	16,58	29,05	-0,08	1,78
		----------Terço médio da encosta----------				
DS	0,0-0,1	1,36 b	1,35	10,98	0,12	-0,37
	0,1-0,2	1,39 a	1,39	8,16	-0,92	1,97
	0,2-0,3	1,37 b	1,39	13,22	0,76	4,44
Macroporosidade	0,0-0,1	0,19 a	0,19	0,20	2,61	10,98
	0,1-0,2	0,19 a	0,19	18,29	-0,26	1,74
	0,2-0,3	0,18 a	0,18	26,30	-3,08	16,63
Microporosidade	0,0-0,1	0,28 a	0,27	14,42	0,57	-0,66
	0,1-0,2	0,27 a	0,27	14,54	0,15	1,54
	0,2-0,3	0,26 a	0,27	0,24	-3,20	19,49
PT	0,0-0,1	0,47 a	0,47	8,22	0,82	0,81
	0,1-0,2	0,47 a	0,47	8,08	-0,12	1,55
	0,2-0,3	0,44 b	0,45	20,68	-5,25	35,77
RP	0,0-0,1	5,97 a	5,38	45,95	2,76	9,28
	0,1-0,2	4,98 b	4,69	45,95	0,81	1,47
	0,2-0,3	4,98 b	4,69	26,37	0,81	1,47
Umidade	0,0-0,1	17,81 a	18,54	24,29	0,14	1,92
	0,1-0,2	16,08 a	17,02	32,52	0,25	0,50
	0,2-0,3	16,28 a	17,06	28,41	-0,06	1,72

		----------Terço inferior da encosta----------				
DS	0,0-0,1	1,21 b	1,35	33,77	-2,48	5,21
	0,1-0,2	1,32 a	1,33	8,60	-1,63	3,95
	0,2-0,3	1,31 a	1,33	21,83	-3,65	16,09
Macroporosidade	0,0-0,1	0,18 a	0,18	28,50	0,13	2,29
	0,1-0,2	0,18 a	0,18	22,61	1,46	6,34
	0,2-0,3	0,19 a	0,17	21,60	1,86	6,03
Microporosidade	0,0-0,1	0,29 a	0,30	0,30	-1,66	4,51
	0,1-0,2	0,29 a	0,28	0,21	0,23	2,74
	0,2-0,3	0,27 a	0,28	21,05	-1,19	1,47
PT	0,0-0,1	0,44 b	0,48	33,76	-2,43	4,74
	0,1-0,2	0,47 a	0,47	18,48	-1,87	17,57
	0,2-0,3	0,45 a	0,47	21,18	-3,72	15,97
RP	0,0-0,1	7,32 a	5,33	66,43	2,72	8,39
	0,1-0,2	5,34 b	5,38	28,80	2,55	8,89
	0,2-0,3	5,22 b	4,69	28,78	3,79	21,65
Umidade	0,0-0,1	18,50 a	19,20	23,24	0,12	2,08
	0,1-0,2	16,61 ab	17,56	31,35	0,12	0,51
	0,2-0,3	16,91 a	17,68	27,16	-0,08	1,78

[1]Médias seguidas pela das mesmas letras na linhas não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey; [2]CV = Coeficiente de Variação.

A macroporosidade se manteve constante nas profundidades de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, acordando com os resultados obtidos por Soracco et al. (2012), que estudaram a contribuição da macroporosidade para o fluxo total de água em diferentes tipos de solo e não encontraram diferença significativa para macroporos nas camadas mais profundas do solo estudado (Tabela 10).

Tabela 11. Análise descritiva para massa de raízes (g) e produtividade do feijoeiro (g) nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m no terço inferior, médio e superior da encosta.

Variável	[1]Média	Mediana	[1]CV	Assimetria	Curtose
	----------Terço inferior da encosta----------				
Massa raízes	370,44	252,57	68,14	2,30	4,71
Produtividade	900,63	910,46	23,28	-0,19	1,86
	---------- Terço Médio da encosta ----------				
Massa raízes	307,30	252,57	40,29	2,25	4,54
Produtividade	999,2 3	1019,56	23,73	-0,79	1,92
	---------- Terço inferior da encosta ----------				
Massa raízes	311,51	252,57	45,68	2,95	10,16
Produtividade	1067,0	1060,0	18,50	-0,07	0,61

[1]CV = Coeficiente de variação.

Analisando as médias nas três faixas do terreno, o volume de microporos está abaixo do considerado ideal que foi de 0,33 m^3 m^{-3}, que representa 1/3 do total de poros. Segundo Taylor e Aschroft (1972) este valor atribui limitações ao pleno desenvolvimento do sistema radicular, tendo em vista que ocorre a diminuição na taxa de difusão de gases pela dificuldade de infiltração da água no solo.

A porosidade total do solo ficou abaixo do limite inferior para solos agrícolas propostos por Kiehl (1979) e Azevedo e Dalmolin (2006) sendo de 0,50 m^3 m^{-3} (Tabela 10), os limites baixos de aeração do solo alteram a ramificação de raízes presentes na superfície do solo, fazendo com que a planta seja limitada a absorção de água nos primeiros centímetros do solo, aumentando a ausência de água nos períodos de estiagem. Deve-se ressaltar que áreas com cultivo de grãos sofrem compactação pelo tráfego de máquinas, seja durante a semeadura ou durante os tratos culturais e a colheita (SPERA et al., 2006). A porosidade total foi dada pelo arranjo do contato entre as partículas sólidas, e quando há um arranjo conexo, então há predominância de sólidos na amostra de solo, em consequência a porosidade total foi baixa; ao contrário se as partículas do solo não se arranjam em agregados, então predominam os vazios e a porosidade foi elevada (RIBEIRO et al., 2007).

Observa-se que a porosidade total diminui de acordo com a profundidade, demonstrando que suas partículas sólidas se arranjam num contato uma a uma, relevando os menores valores de PT e confirmando o comportamento de DS que apresenta maiores valores (Tabela 10). A textura do solo representa um dos principais fatores característicos dos horizontes do solo, visto que em conjunto com a estrutura do solo atribuem os principais atributos que afetam a densidade e porosidade do solo (OLIVEIRA et al., 1992). Para Carlesso e Zimmermam (2000), os solos que apresentam textura média e argilosa que onde comumente há a ocorrência agregados porosos, associado a um alto teor de matéria orgânica, os espaços porosos por volume são elevados, em contrapartida em solos arenosos a porosidade total foi habitualmente menor.

Constata-se que os valores de densidade do solo variaram entre 1,33 a 1,39 kg dm^{-3} (Tabela 10), assemelhando aos valores obtidos por Faraco et al. (2008). Comparando aos valores obtidos por Souza et al. (2004) e Schafrath et al. (2008) a microporosidade obtida demonstra valores baixos 0,26 a 0,29 m^3 m^{-3} enquanto a macroporosidade valores altos 0,20 m^3 m^{-3}. Discordando dos resultados obtidos por Santos et al. (2012) que observaram valores

altos de microporosidade (0,46 m^3 m^{-3}) e menores valores para macroporosidade (0,08 m^3 m^{-3}).

O comportamento foi semelhante nas três profundidades e posições do solo estudado, para a densidade do solo e microporosidade, sendo observados os maiores valores na profundidade de 0,10-0,20 m (Tabela 10). A densidade não foi afetada nas três camadas estudadas, concordando com Stone et al. (2002) que verificaram a influência da compactação nos atributos físicos de transmissão de água e desenvolvimento do feijoeiro, trabalhando em colunas de solo para simular as densidades de 1,0, 1,2, 1,4 e 1,6 g dm^3 do solo. As taxas de densidade do solo em estudo podem ser explicadas pela dispersão de argila observada nesse solo, a movimentação de argila no solo leva ao entupimento de poros promovendo uma compactação, provocado pela migração de partículas finas nas camadas subsuperficiais do solo. De acordo com Helalia et al. (1998) a ocorrência de um alto valor de GDA no solo associado à movimentação do solo nas camadas superficiais contribui para o rearranjamento de partículas do solo promovendo a eluviação de argila para camadas subsuperficiais, bem como o adensando dessa faixa do solo (SILVA et al., 1998). O GDA também exerce forte influência sobre o encrostamento superficial e taxa de infiltração (LEVY et al., 1993), visto que as partículas são rearranjadas e consolidadas, formando uma estrutura superficial coesa, apresentando uma espessura que pode variar entre 0,1 mm alcançando até 50 mm na superfície do solo (VALENTIN e BRESSON, 1992). O arranjo de partículas no solo (argila e areia) influenciaram na densidade do solo, bem como na taxa de infiltração de água no solo na pesquisa de Orjuela-Mata et al. (2012), os autores trabalharam com Latossolo Vermelho no oriente da Colômbia.

O encrostamento do solo e aumento da coesão pode ser relacionado à taxa de resistência do solo à penetração observada no solo em estudo, visto que os valores de densidade do solo e resistência do solo à penetração seguem as mesmas tendências, aumentando de acordo com a profundidade (Tabela 10). Na profundidade de 0,00-0,10 m, foram observados os menores valores de RP, podendo ser explicado pelo provável conteúdo de matéria orgânica nessa faixa do solo, proveniente da decomposição de palha na superfície ou dos cortes no solo promovidos por implementos rompedores na semeadura e adubação no sistema de plantio direto (COLLARES et al., 2006).

Quando comparadas estatisticamente os valores da RP nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, observaram os maiores valores para a resistência do solo à penetração com diferença significativa em relação a camada de 0,0-0,10 m (Tabela 10), concordando com os resultados obtidos por Martins et al. (2009) que relacionando os atributos de um Latossolo Vermelho com a produtividade do feijoeiro também encontraram aumento da DS associado a RP nas camadas subsuperficiais do solo.

Os valores médios de RP no solo encontrados variaram de 3,01 a 7,25 MPa, sendo superiores a 2,0 MPa (Tabela 10). Assemelhando aos resultados obtidos por Collares et al. (2006) e Roque et al. (2008) estudando os atributos do solo e produtividade do feijoeiro sob Latossolo Vermelho. Segundo Silva et al. (1994) essas condições de RP são restritivas ao desenvolvimento radicular e limitantes a taxa de produtividade das culturas. Os elevados valores de RP no solo podem ser explicados pela umidade do solo na amostragem, que variou de 0,16 a 0,18 kg kg^{-1}, justificado pelo fato de que a época de amostragem se enquadrava no período onde não há ocorrência de chuvas (julho), por ser o intervalo entre um cultivo e outro e a área não está sendo irrigada. Os maiores valores de RP foram crescentes em profundidade atingindo valores máximos de restrição na camada de 0,10-0,20 m ao sistema radicular do feijoeiro, visto que a maior concentração de raízes de feijão foi observada nessa faixa do solo (DOS SANTOS et al., 2005). Estes resultados são corroborados pelos encontrados por Collares et al. (2008) que verificaram uma maior concentração de raízes do feijoeiro na profundidade de 0,00-0,10 m do solo. Podendo ser explicado pela ocorrência de elevada compactação na profundidade de 0,20-0,30 m do solo, visto que a amostragem nessa profundidade não obteve material para comparação.

Os maiores valores de RP observados foi de 7,25 MPa, são atribuídos à presença de pedras na área, uma vez que nessa faixa do terreno há o acumulo de sedimentos carreados por força da água (Tabela 10). A adaptabilidade a condições adversas explica muitas vezes o desenvolvimento de plantas a locais onde a condição física do solo foi considerada limitante ou restritiva, pois a compactação do solo restringe o crescimento á partir do ponto onde ela foi iniciada nas profundidades do solo (MONTAGU et al., 2001) então as raízes mudam a direção de crescimento (CLARCK et al., 2003) e comumente concentra-se na faixa superficial do solo.

Na zona onde se observou os maiores valores de RP o solo é mais raso por estar situado no final da encosta (terço inferior) e estar próximo ao manancial de captação de água

(Tabela 10). Com a redução de volume do solo a movimentação de água na superfície e subsuperfície foi afetada, podendo inferir também no desenvolvimento de raízes no solo (SOUZA et al., 2008). Costa et al. (2011) estudaram as a influência da profundidade do solo e formato da superfície do terreno sob Cambissolo Háplico na produção do bananal irrigado e constataram que o microrrelevo exerceu influência sobre a produtividade da planta.

Na ocorrência de compactação nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m do solo, o crescimento de raízes, estando no começo do ciclo e sem impedimentos tende a concentrar-se na faixa superficial do solo, logo o acesso à água e nutrientes pode ser comprometido em períodos de estiagem (BEGON et al., 1996). No caso do feijoeiro o período crítico de deficiência hídrica foi locado na floração (MASSIGNAN e ANGELOCCI, 1993).

A produtividade obtida foi de 978,70 kg ha^{-1}, o número médio de vagens por planta foi de 27, 6 grãos por vagem e peso de 1.000 grãos no terço superior foi de 359,64 g, no terço médio de 352,16 g e terço inferior da encosta de 342,53 g (Tabela 10). A produtividade média foi 52% menor que a alcançada no trabalho de Montanari et al. (2010) estudando a cultura do feião irrigado em um Latossolo Vermelho distroférrico, 50% menor que a média encontrada por Roque et al. (2008) sob Latossolo Vermelho e 68% também abaixo dos valores encontrados por Dalchiavon et al. (2011) sob Latossolo Vermelho. Ainda, abaixo da média nacional que foi da ordem de 1.000 a 3.000 kg ha^{-1} e da média do estado de Goiás de 1.895 kg ha^{-1} segundo a Conab (2012).

Quanto aos alcances, as variáveis DS, macroporosidade, microporosidade e porosidade total obtiveram alcances de intensidade média (Tabela 12), resultados que se assemelham aos de Souza et al. (2001) que investigaram os atributos físicos de um Latossolo Vermelho distrófico sob semeadura direta. A variável RP obteve alcances médio na profundidade de 0,00-0,10 m de 23,70 m e alto nas profundidades de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m (139,00 e 99,30 m) respectivamente (Tabela 12), valores que superaram os alcances obtidos por Carvalho et al. (2006) que correlacionaram a resistência do solo à penetração com a produtividade do feijoeiro sob Latossolo Vermelho e obtiveram alcances variando entre 64 e 67 m. A massa de raízes obteve alcance de intensidade média demonstrando que os valores alcançados não se distanciam a estrutura espacial de raízes no solo sendo homogênea na área. Para a produtividade da área o valor do alcance obtido foi de 29,80 m, próximo aos valores

obtidos por Freddi et al. (2005) sob Latossolo Vermelho em sistema de plantio direto, os quais obtiveram alcances de 11,1 e 26,1 m.

Os modelos de ajuste dos semivariogramas para as variáveis DS, macroporosidade, microporosidade, porosidade total e massa de raízes(Tabela 12) foram em sua maioria o exponencial, com exceção de DS na profundidade de 0,0-0,10 m, RP nas profundidades de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m e produtividade (Tabela 13) que obtiveram melhor ajuste ao modelo esférico e a macroporosidade na profundidade de 0,00-0,10 m que se ajustou ao modelo gaussiano.

Tabela 12. Parâmetros dos semivariogramas ajustados para os atributos densidade do solo-DS (kg dm^{-3}), macroporosidade (m^3 m^{-3}), microporosidade (m^3 m^{-3}), porosidade total-PT (m^3 m^{-3}) e resistência do solo à penetração-RP (MPa) nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

Variável	Prof. (m)	Modelo[5]	[1]C_0	Patamar	[2]C_0/C_0+C_1	[3]R^2	Alcance	[4]PV[1]
DS	0,0-0,1	Esf	0,00	0,01	0,94	0,08	12,50	<0,0100
	0,1-0,2	Exp	0,00	0,00	0,85	0,39	22,20	<0,0100
	0,2-0,3	Exp	0,00	0,00	0,83	0,42	27,60	<0,0100
Macro	0,0-0,1	Gaus	0,00	0,00	0,85	0,54	13,16	<0,0100
	0,1-0,2	Exp	0,00	0,00	0,50	0,96	41,30	<0,0100
	0,2-0,3	Exp	0,00	0,00	0,50	0,86	37,80	<0,0100
Micro	0,0-0,1	Exp	0,00	0,00	0,82	0,29	27,00	<0,0100
	0,1-0,2	Exp	0,00	0,00	0,72	0,28	6,80	<0,0100
	0,2-0,3	Exp	0,00	0,00	0,87	0,30	20,10	<0,0100
PT	0,0-0,1	Exp	0,00	0,00	0,84	0,57	25,20	<0,0100
	0,1-0,2	Exp	0,00	0,00	0,88	0,41	14,10	<0,0100
	0,2-0,3	Exp	0,00	0,00	0,93	0,07	10,50	<0,0100
RP	0,0-0,1	Exp	0,72	1,47	0,50	0,87	23,70	<0,0100
	0,1-0,2	Esf	1,92	4,26	0,54	0,92	139,00	<0,0100
	0,2-0,3	Esf	1,87	5,40	0,65	0,90	99,30	<0,0100

[1]C_0 = Efeito Pepita; [2]C_0/C_0+C_1 = Grau de dependência espacial; [3]R^2 = Coeficiente de determinação; [4]PV[1] = Teste de Komogorov-Smirnov; [5]EXP = exponencial, ESF = esférico e GAUS = gaussiano

Tabela 13. Parâmetros dos semivariogramas ajustados para massa de raízes (g) e produtividade do feijoeiro (kg ha^{-1}) nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

Variável	Modelo[5]	[1]C_0	Patamar	[2]C_0/C_0+C_1	[3]R^2	Alcance	[4]PV^1
Massa raízes	Exp	1,60	9640,0	0,89	0,53	28,80	<0,0100
Produtividade	Esf	2,37	47900,0	0,50	0,80	29,8	>0,1500

[1]C_0 = Efeito Pepita; [2]C_0/C_0+C_1 = Grau de dependência espacial; [3]R^2 = Coeficiente de determinação; [4]PV^1 = Teste de Komogorov-Smirnov; [5]EXP = exponencial, ESF = esférico e GAUS = gaussiano

O sistema radicular do feijoeiro tem maior expressão na faixa de 0,20 a 0,30 m, coincidentemente para este estudo foi nessa faixa onde sofreu as maiores limitações, assim a produtividade do feijoeiro também foi reduzida (Tabela 11). Collares et al. (2008) sob Latossolo Vermelho observaram uma redução na produtividade do feijoeiro relacionada a elevada RP que provocou a restrição de raízes no solo.

A produtividade obtida no terço superior, médio e inferior do terreno estudado se correlaciona com o comportamento da RP (Tabela 10). Tal comportamento foi comprovado pelo teste de Tukey que constatou diferença significativa no terço médio e superior em relação ao terço inferior da encosta. Em trabalho com feijoeiro irrigado, Montanari et al. (2010), verificaram que a cultura não alcançou a sua capacidade de produção com base nas médias nacionais, em razão do elevado nível de compactação do solo estudado. A variação na produtividade pode também ser explicada pela posição topográfica, é sabido que as partes do terreno de maior gradiente topográfico apresentam maiores produtividades. Bem como as características do solo são alteradas pelo relevo, sendo condicionadas pela pedoforma e concavidades do terreno que influenciam decisivamente na produtividade das culturas (ANDALES et al., 2007).

A análise dos mapas de DS na profundidade de 0,00-0,10 m, permite inferir que no terço superior ocorre a predominância de valores de DS na faixa de 1,05 a 1,20 kg dm^{-3} (Figura 22). Enquanto no terço médio os valores predominantes variam entre 1,35 a 1,50 kg dm^{-3}, observado um limite na posição sul onde os valores estão entre 1,50 e 1,65 kg dm^{-3} e no terço inferior a predominância foi da ordem de 1,05 a 1,20 kg dm^{-3}. Na profundidade de 0,10-0,20 m, observa-se que no terço superior da encosta a predominância dos valores foi da ordem de 1,32 a 1,44 kg dm^{-3}, enquanto no terço médio e inferior os valores estão entre 1,44 a 1,56 kg dm^{-3} da posição oeste a leste. Estes valores são próximos aos valores máximos encontrados

nessa profundidade, o que corrobora para a afirmação de que a DS foi maior nas faixas mais profundas, Centurion et al. (2007) trabalhando com Latossolo Vermelho também observaram que os maiores valores de DS ocorreram na camada de 0,10-0,20 m do solo influenciado pelo manejo.

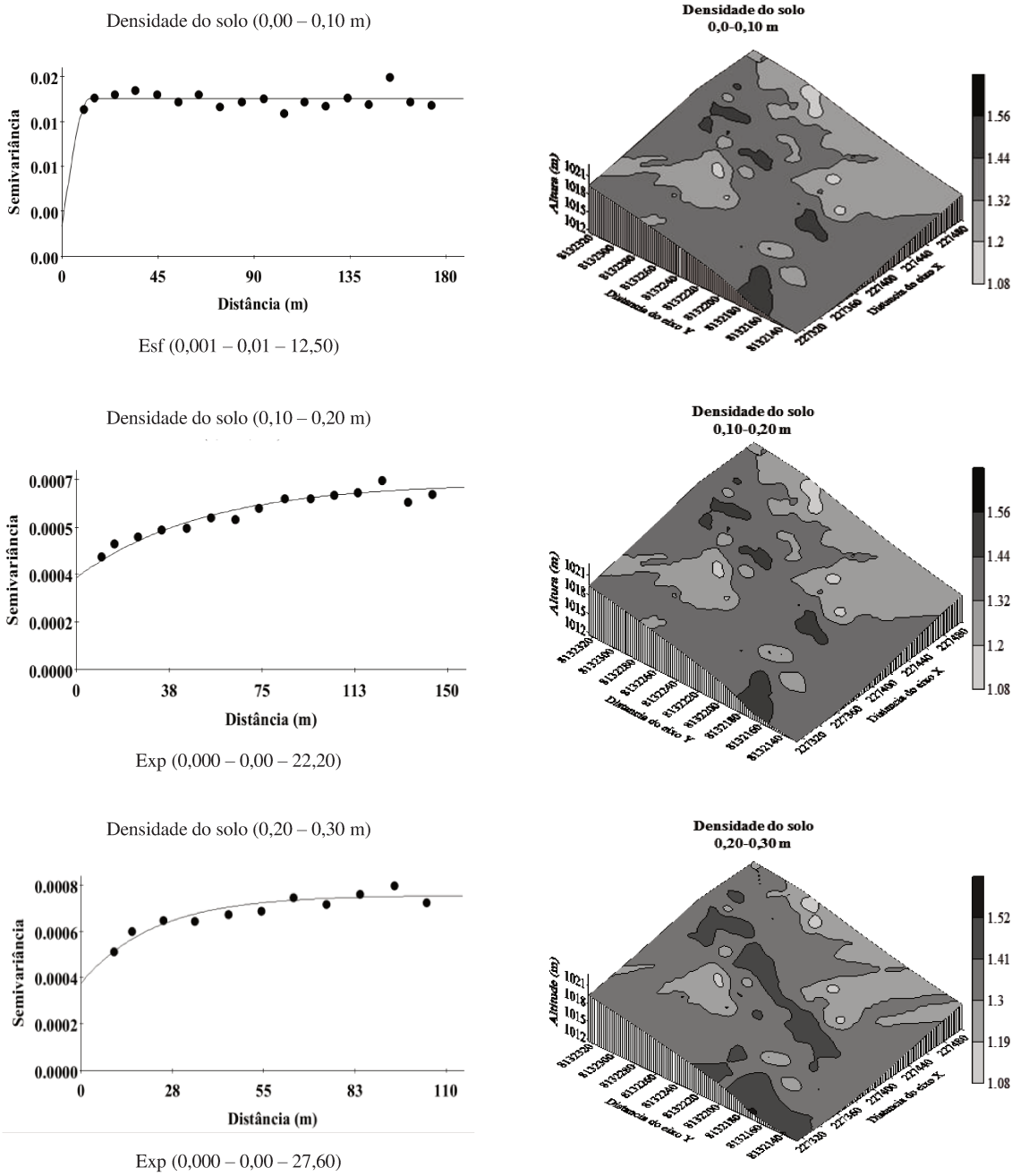


Figura 22. Semivariogramas e mapas do atributo densidade do solo (kg dm^{-3}), nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

É valido ressaltar que naturalmente solos com maior proporção de partículas grossas (areia) (Tabelas 2,3 e 4) apresentam maior densidade em relação a solos com predominância de partículas finas, em condições de manejo solos de maior proporção de partículas finas apresentam maiores valores de DS (BRADY, 1989). Esses resultados permitem afirmar que ocorre a movimentação de partículas finas na vertente, explicado pelo predomínio de carga líquida negativa e a migração da argila influenciada pelas forças de floculação e dispersão desse solo.

Na análise dos mapas de PT na profundidade de 0,00-0,10 m, observa-se que no terço superior na posição oeste a predominância dos valores de PT da ordem de 0,43 a 0,45 m^3 m^{-3}, na posição leste os valores estão entre 0,48 a 0,50 m^3 m^{-3} (Figura 23). Do terço médio os valores estão na ordem de 0,43 a 0,48 m^3 m^{-3}. Na profundidade de 0,10-0,20 m, os valores predominantes variaram de 0,46 a 0,47 m^3 m^{-3} da posição leste a oeste. Na profundidade de 0,20-0,30 m, os valores predominantes são da ordem de 0,43 a 0,46 m^3 m^{-3}. Verifica-se que os valores de PT diminuem no perfil do solo, que pode ser explicada pela ocorrência de alterações promovidas na dispersão das argilas que provocou a obstrução de poros na profundidade subsuperficial do solo, por conta do material disperso ou desagregado que foi reorientado no perfil com a percolação. A consequência do rearranjamento desordenado de partículas finas no solo e a obstrução dos poros e elevação da densidade do solo, aumentando a concentração de partículas sólidas por unidade de volume (ANJOS et al., 1994; OLIVEIRA et al., 2000; SPERA et al., 2009).

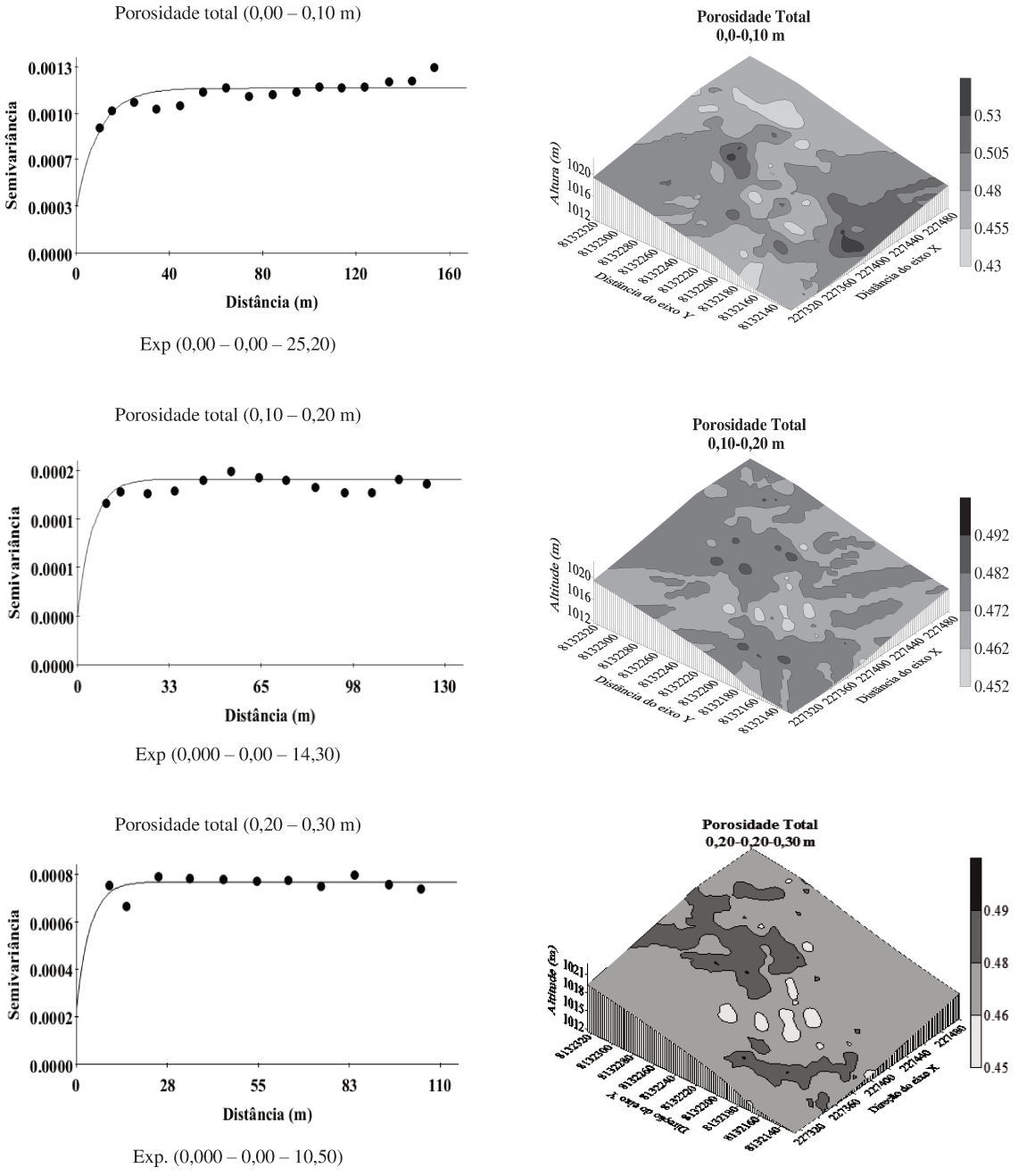


Figura 23. Semivariogramas e mapas da porosidade total (m^3 m^{-3}), nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

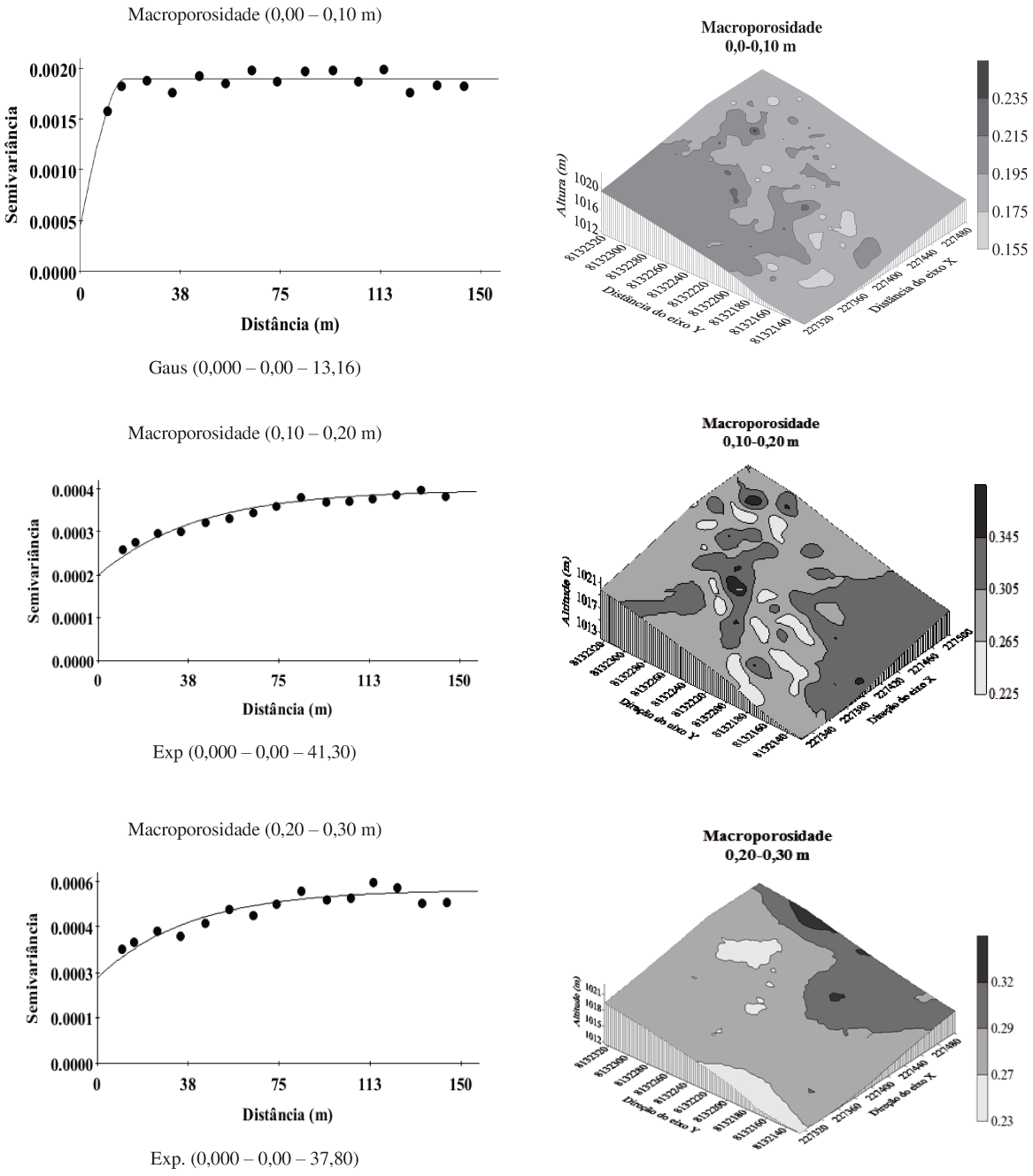


Figura 24. Semivariogramas e mapas da macroporosidade (m^3 m^{-3}), nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

A análise dos mapas de macroporosidade na profundidade de 0,00-0,10 m, mostra que a classe dominante foi da ordem de 0,16 a 0,18 m^3 m^{-3} (Figura 24). No terço superior verificou os menores valores de macroporosidade nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, enquanto os maiores valores foram observados no terço inferior da encosta,

podendo ser explicado pelo elevado volume de água pelo fluxo acumulado condicionando a macroporosidade no terço inferior da encosta, afirmando a influência de areia grossa e argila na macroporosidade, levando em consideração que essas duas frações tem o mesmo comportamento no solo. Portanto, a reorientação dessas duas frações no terço inferior da encosta do terreno resulta em maiores valores de macroporosidade.

Na profundidade de 0,10-0,20 m, o comportamento foi semelhante ao da profundidade de 0,00-0,10 m, porém, a classe dominante está entre 0,26 a 0,30 m^3 m^{-3} (Tabela 10). Na profundidade de 0,20-0,30 m, no terço superior os maiores valores de microporosidade são de 0,28 a 0,33 m^3 m^{-3}, enquanto no terço médio e no terço inferior os valores estão entre 0,26 a 0,28 m^3 m^{-3}. Observa-se que os valores de microporosidade são próximos em toda a vertente, isso pode ser explicado pelo fato de que o maior volume das frações areia grossa e areia muito grossa não favorece o seu carreamento e concentração em determinadas partes da vertente, contrariamente a argila foi transportada com mais facilidade pela água, visto que nas zonas onde ocorrem maiores valores de areia grossa e areia muito grossa são evidenciadas menores valores de microporosidade e argila. Para este estudo o fluxo acumulado de água na vertente atua como principal agente de formação das zonas de acumulo de partículas finas como silte e argila, portanto, são observados valores de microporosidade se mantendo constates por toda a vertente.

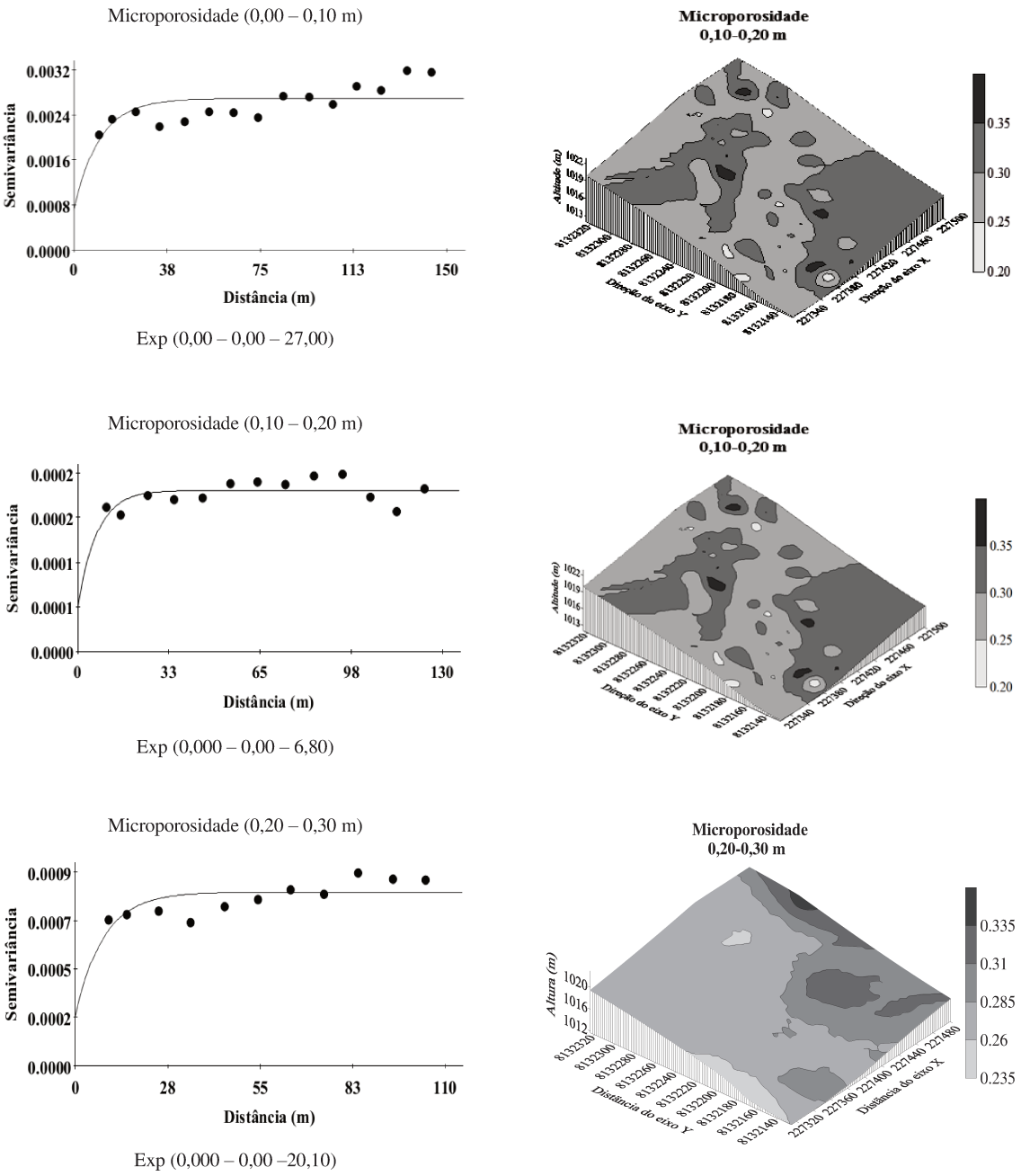


Figura 25. Semivariogramas e mapas de microporosidade, nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

Verifica-se que na profundidade de 0,00-0,10 m a classe dominante no terço superior e médio está entre 2,4 e 3,2 MPa, enquanto no terço inferior da encosta os valores estão entre 4,0 e 5,6 MPa (Figura 26). Na profundidade de 0,10-0,20 m, os valores de maior ocorrência no

terço superior e médio estão entre 3,5 a 5,2 MPa, enquanto no terço inferior da encosta os valores estão entre 5,2 a 8,6 MPa. Na profundidade 0,20-0,30 m, os valores predominantes no terço superior e médio estão entre 4,0 e 6,5 MPa, enquanto no terço inferior da encosta estão entre 6,5 e 9,0 MPa. Trabalhos de De Maria et al. (1999) e Tavares Filho et al. (2001) comparando o sistema plantio convencional e direto constataram que as menores diferenças de RP nos sistemas de preparo se refletem na camada superficial do solo.

Observa-se um aumento da RP em profundidade e no terço inferior da encosta (Figura 26). Esses resultados são consequência da desagregação do solo associada a alterações eletroquímicas, seja pelo PCZ ou carga líquida negativa, que favorece a dispersão de argila e desestruturação de agregados do solo, influenciadas pela calagem ou pelos ciclos de umedecimento e secagem e ainda pelo uso indiscriminado de irrigação ao solo. Portanto, todos esses fatores podem explicar a formação de camadas compactadas no perfil do solo (PRADO, 2003).

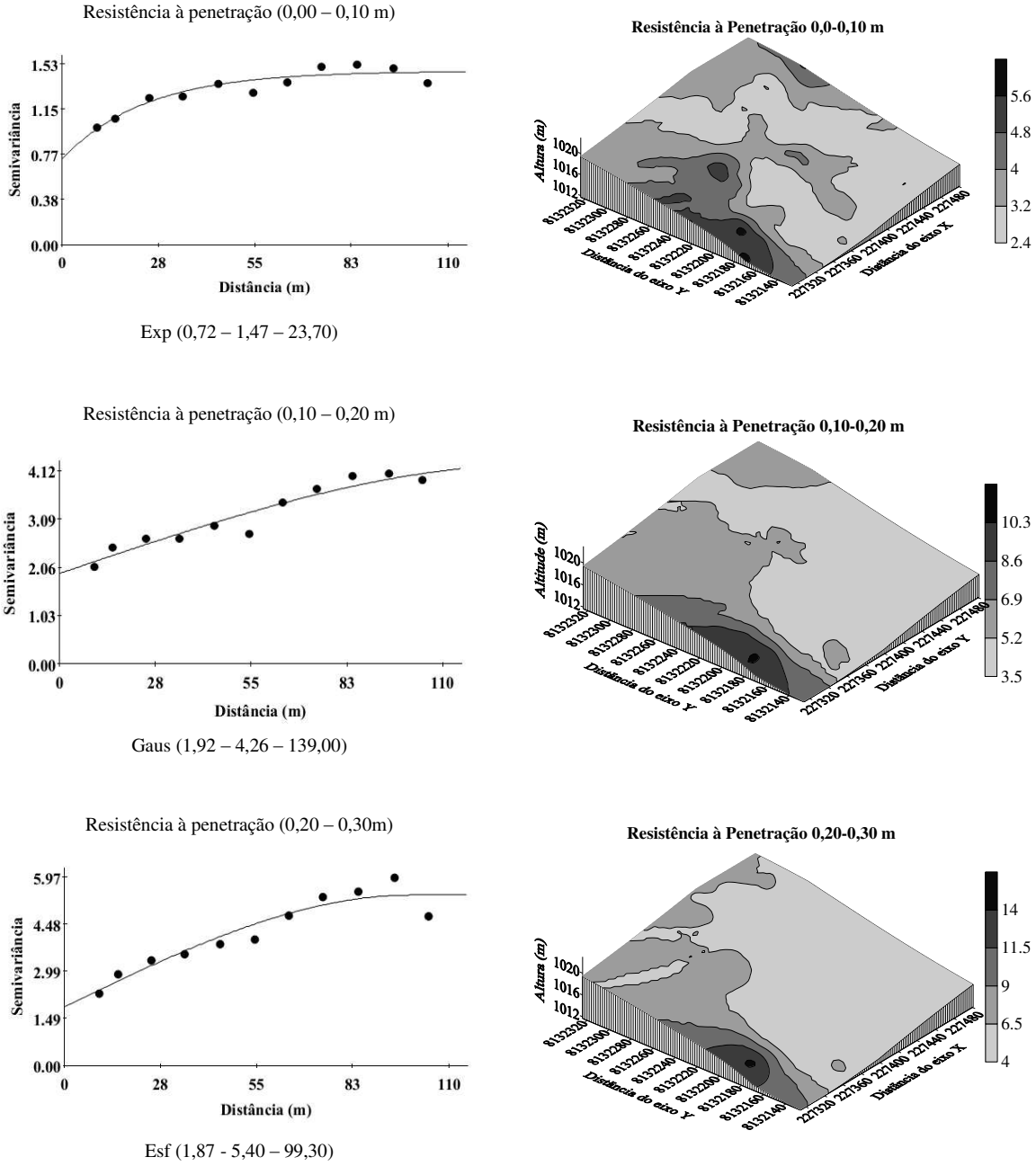


Figura 26. Semivariogramas e mapas da resistência do solo à penetração (MPa), nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

Observa-se pelo mapa de raízes que a concentração média foi de 250 a 500 g, no terço superior, médio e inferior da posição leste a oeste da vertente (Figura 27). Os maiores valores da massa de raízes se concentraram na profundidade de 0,00-0,10 m do solo, por esse

motivo não foi observada uma variação elevada dos dados que se mostraram praticamente iguais em toda a vertente. Os valores de RP justificam os valores baixos da massa de raízes no solo, uma vez que a RP restringiu o sistema radicular impedindo que alcançasse as faixas mais profundas do solo.

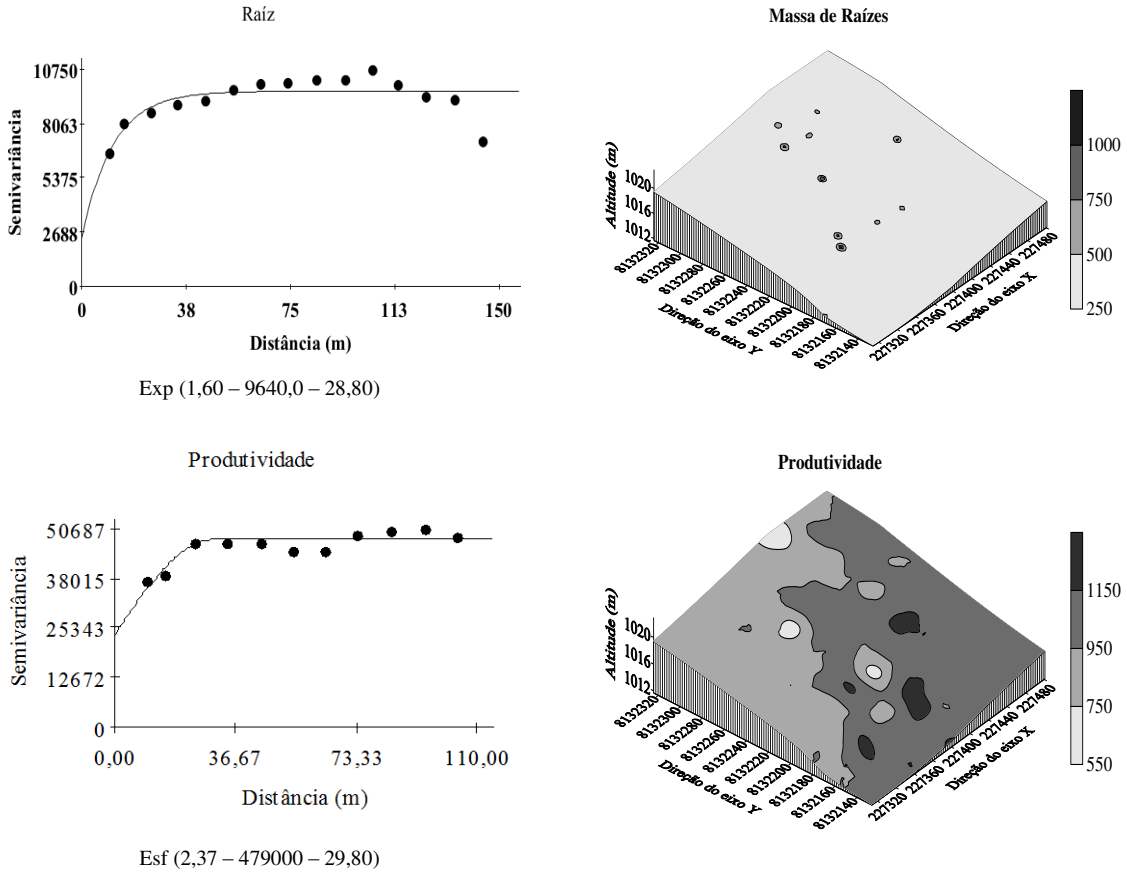


Figura 27. Semivariogramas e mapas de massa de raiz e produtividade da área estudada, nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

Verifica-se por meio do mapa de produtividade que no terço superior do terreno da região leste a oeste a produtividade variou de 950 a 1.150 g, também observado esses valores no terço médio a oeste e no terço inferior da encosta a oeste (Figura 27). No terço médio e inferior a leste os valores de maior ocorrência são de 750 a 950 g. Observa-se que as zonas do terreno com maior produtividade são as de maior altitude e que apresentam menores valores de resistência do solo à penetração, Roque et al. (2008) trabalhando sob Latossolo Vermelho, relacionaram a produtividade do feijoeiro a resistência do solo à penetração e observaram que a taxa de produtividade foi maior nas áreas do terreno onde o grau de RP era menor. De

maneira geral a produtividade foi maior nas partes mais altas do terreno confirmando que a declividade comanda toda a dinâmica dos atributos do solo e, ainda, as posições de menor cota também obtiveram maior incidência de resistência do solo à penetração, fato que pode explicar a menor taxa de produtividade nessa parte do terreno. Carvalho et al. (2006) observaram que a RP aumentou concomitantemente com a profundidade do solo (0,20-0,30 m) no entanto não foi prejudicial ao desenvolvimento do feijoeiro irrigado a ponto de reduzir a taxa de produtividade, uma vez que esta ficou na faixa média estipulada para o estado. Fatores como água, temperatura, oxigênio e resistência mecânica à penetração influenciam de forma direta na produtividade das plantas e são condicionados pelos atributos do solo que por sua vez esta sujeita a alterações controladas pelo relevo.

6. CONCLUSÕES

A predominância de carga líquida negativa foi confirmada pelos valores de delta pH, que provocou o elevado grau de floculação e dispersão do solo causando a movimentação de argila na vertente.

Os valores de densidade do solo e resistência do solo à penetração apresentaram comportamento semelhante no perfil do solo influenciado pela migração de partículas finas.

A compactação do solo limitou o alcance do sistema radicular do feijoeiro as faixas mais profundas do solo estudado, visto que este se concentrou na faixa de 0,10-0,20 m do solo.

Houve perdas significativas de produtividade do feijoeiro em razão do elevado nível de compactação do solo.

7. REFERÊNCIAS BILIOGRÁFICAS

ABBO-GHOBAR, H. M. Influence of irrigation water quality on soil infiltration. **Irrigation Science**, New York, v.11, n.1, p.13-19, 1993.

AGENDA ESTRATÉGICA 2010-2015, FEIJÃO. Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA), 52p.

AMARO FILHO, J.; NEGREIROS, R. F. D.; ASSIS JUNIOR, 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**, Viçosa, v.31, n.3, p.415-422, 2007.

ANDALES, A. A.; GREEN, T. R.; AHUJA, L. R.; ERSKINE, R. H.; PETERSON, G. A. Temporally stable patterns in grain yield and soil water on a dryland catena. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v.94, n.4, p.119-127, 2007.

ANDREOTTI, M.; CARVALHO, M. P.; MONTANARI, R.; BASSO, F. C.; PARIZ, C. M.; AZENHA, M. V.; VERCESE, F. Produtividade da soja correlacionada com a porosidade e densidade de um Latossolo Vermelho do cerrado brasileiro. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.40, n.3, p.520-526, 2010.

ANJOS, J. T.; UBERTI, A. A. A.; VIZZOTTO, V. J.; LEITE, G. B.; KRIEGER, M. Propriedades físicas em solos sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v.18, n.3 p.139-145, 1994.

ANTONIANE, A. O. R.; SOUZA, Z. M.; BARBOSA, R. S.; SOUZA, G. S. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, n.7, p.744-750, 2010.

APOLINO, J. N. S.; CABEDA, M. S. V.; CARVALHO, F. G.; LIMA, J. F. W. Alterações físicas e químicas de um Argissolo Amarelo sob diferentes sistemas e uso de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.1, p.126-136 2006.

AZEVEDO, A. C.; DALMOLIN, R. S. D. **Solos e ambiente: uma introdução**. 2.ed. Santa Maria: Pallotti, 2006. 100p.

AZEVEDO, A. C.; BONUMÁ, A. S. Partículas coloidais, dispersão e agregação em latossolos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.2, p.609-617, 2004.

AZEVEDO, E. C. **Uso da geoestatística e de recursos de geoprocessamento no diagnóstico da degradação de um solo argiloso sob pastagem no estado de Mato Grosso**. Campinas: 2004. 141 f. Tese (Doutorado em Engenharia na Agricultura) UNICAMP.

BARBIERI, D. M.; SOUZA, Z. M.; VIEIRA, J. C.; MARQUES JUNIOR, J.; CORÁ, J. E.; PEREIRA, G. T. Dependência espacial de atributos granulométricos em um Latossolo Vermelho eutroférrico sob cultivo de cana-de-açúcar na Região de Jaboticabal (SP). In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14., Cuiabá, 2002. **Anais...** Cuiabá, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. CD-ROM.

BEGON, M.; HARPER, J. L.; TOWNSEND, C. R. **Ecology: individuals, populations and communities**. 3.ed. Oxford: Blackwell Science, 1996. 168p.

BENITES, V. M.; MENDONÇA, E. S. Propriedades eletroquímicas de um solo eletropositivo influenciadas pela adição de diferentes fontes de matéria orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.2, p.215-221, 1998.

BERTOL, I.; SCHICK, J.; MASSARIOL, J. M. M.; REIS, E. F.; DILY, L. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico álico afetadas pelo manejo do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.30, n.1, p.91-95, 2000.

BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J. A.; AMARAL, A. J.; ZOLDAN JUNIOR, W. A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.1, p.1-9, 2004.

BIELDERS, C. L.; GRYMONPREZ, B. Rain drop impact: a neglected but potentially major contributor to particle mobilization in soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.74, n.5, p.1446-1456, 2010.

BINOTTI, F. F. S.; ORIVALDO, A. R. F.; CARDOSO, J. G. R.; SÁ, E. S.; BUZETTI, S.; NASCIMENTO, V. Fontes e doses de nitrogênio no feijoeiro de inverno irrigado no sistema de plantio direto. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.26, n.5, p.770-778, 2010.

BIZARI, D. R.; MATSURA, E. E.; ROQUE, M. W.; SOUZA, A. L. Consumo de água e produção de grãos do feijoeiro irrigado em sistemas plantio direto e convencional. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.39, n.7, p.2073-2079, 2009.

BIZARI, D. R.; MATSURA, E. E.; CHAMLET, J.; MESQUITA, M.; SALVADOR, C. A. Profundidade efetiva de raízes e sua relação com a parte aérea da cultura do feijoeiro irrigado em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.4, n.3, p.172-183, 2010.

BRADY, N.C. **Natureza e propriedades dos solos**. 7.ed. São Paulo: Freitas Bastos, 1989. 878p.

BRAGA, L.P.V. **Geoestatística e Aplicações**. In : SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PROBABILIDADE E ESTATÍSTICA, 9, São Paulo: IME/USP, 1990, 36p.

BURROUGH, P.A.; McDONNEL, R.A. **Principles of geographical information systems**. Oxford: University Press, 1998. 331p.

CASTANHEIRA, N. L.; RAMOS, T.B.; GONÇALVES, M.C.; PRAZERES, A.; MARTINS, J.C.; FERNANDES, M.L.; PIRES, F.P.; SANTOS, F.L. Previsão da qualidade do solo em áreas regadas com águas salinas. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v.33, n.1, p.287-298, 2010.

CAMBRERA-MARTINEZ, F.; HARRIS, W. G.; CARLISLE, V. W.; COLLINS, M. E. Partitioning of clay-sized minerals in coastal plains soils with sandy/loamy boundaries**. Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.53, n.15, p.1584-1587, 1989.

CAHN, M. D.; HUMMEL, J. W.; BROUER, B. H. Spatial analysis of fertility for site-specific crop management. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.58, n.11, p.1240-1248, 1994.

CAJAZEIRA, J. P.; ASSIS JUNIOR, R. N. Variabilidade espacial das frações primárias e agregados de um argissolo no estado do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.42, n.2, p.37-47, 2011.

(Svpring). São José dos Campos, 1997. Dissertação (Mestrado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1997.

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.** Campinas: Instituto Agronômico, p.94. 1986.

CAMARGO, L.A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. Spatial variability of physical attributes of an alfisol under different hillslope curvatures. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.3, p.617-630, 2010.

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**, Viçosa, v.32, n.6, p.2279-2288, 2008.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.

CAMPOS, M. C. C. Relação solo-paisagem em uma área de transição de arenito-basalto na região de Pereira Barreto-SP. Jaboticabal, 2006. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) – Faculdade de Ciências Agrárias Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, 2006.

CAMPOS, C. C. M; RIBEIRO, R. M.; SOUZA JUNIOR, V. S.; RIBEIRO RILHO, M. R.; ALMEIDA, M. C. Relações solo-superfície geomórfica em uma topossequência várzea terra firme na região de Humaitá (AM). **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v.42, n.1, p.37-47, 2012.

CARLESSO, R.; ZIMMERMANN, F. L. **Água no solo: parâmetros para o dimensionamento de sistemas de irrigação**. Santa Maria: UFSM, 2000. 88p.

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**, Viçosa, v.27, n.6, p.695-703, 2003.

CARVALHO, G. J.; CARVALHO, M. P.; FREDDI, O. S.; MARTINS, M. V. Correlação da produtividade do feijão com a resistência à penetração do solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.45, n.3, p.765-771, 2006.

CAVALCANTE, E. G. S.; ALVES, M. C.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** Campina Grande, v.15, n.4, p.237-243, 2011.

CENTURION, J. F.; FREDDI, O. S.; ARATANI, R. G.; METZNER, A. F. M.; BEUTLER, A. N.; ANDRIOLI, I. Influência do cultivo da cana-de-açúcar e da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos Vermelhos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.2, p.199-209, 2007.

CHEN, G.; WEIL, R. R. Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.37, n.4, p.1-11, 2011.

CLARK, L. J.; WHALLEY, W. R.; BARRACLOUGH, P. B. How do roots penetrate strong soil? **Plant and Soil**, Madison, v.255, n.3, p.93-104, 2003.

COELHO, D. S.; CORTEZ, J. W.; OSVELSKI, N. Variabilidade espacial da resistência mecânica à penetração de um vertissolo cultivado com manga no perímetro irrigado de Mandacaru, Juazeiro, Bahia, Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, n.3, p.1035-1045, 2012.

COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.11, p.1663-1674, 2006.

COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Compactação de um latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.3 p.933-942, 2008.

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira: grãos: safra 2010/2011: décimo segundo levantamento: setembro/2011. Brasília, DF, 2011. Disponível em:<http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/119_19_09_49_47_boletim_setembro-2011.pdf > Acesso em: 08 nov. 2012.

CORÁ, J. E.; ARAUJO, A. V.; PEREIRA, G. T.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.6, p.1013-1021, 2004.

COSTA, F. S.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J. A. Calagem e as propriedades eletroquímicas e físicas de um latossolo em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.1, p.281-284, 2004.

COSTA, G.; ALMEIDA, M. C.; FERREIRA, E. L. O.; OLIVEIRA, T. P.; ROMERO, D. E. R. Profundidade do solo e micro-relevo em bananais irrigados: impactos na nutrição mineral e potencial produtivo. **Revista Ciência Agronômica**, Ceará, v.42, n.3, p.567-578, 2011.

DA SILVA, A. F.; QUARTEZANI, W. Z.; ZIMBACK, C. R. L.; LANDIM, P. M. B. **Aplicação da geoestatística em ciências agrárias. Simpósio de geoestatística aplicada em ciências agrárias**. II. Botucatu, 2011. 135p.

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P.; NOGUEIRA, D. C.; ROMANO, D.; ABRANTES, F. L.; ASSIS, J. T.; OLIVEIRA, M. S. Produtividade da soja e resistência mecânica à penetração do solo sob sistema plantio direto no cerrado brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.41, n.1, p.8-19, 2011.

DANTAS, J. D. N.; OLIVEIRA, T. S.; MENDONÇA, E. S.; ASSIS, C. P. Qualidade do solo sob diferentes usos e manejos no perímetro irrigado de Jaguaribe-Apodi, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.2, p.1012-1022 2012.

DE MARIA, I. C.; CASTRO, O. M.; SOUZA DIAS, H. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, n.3, p.703-709, 1999.

DEFOSSEZ, P.; RICHARD, G. Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.67, n.1, p.41-64, 2002.

DEMATTÊ, J. A. M.; FOCHT, D. Detecção de solos erodidos pela avaliação de dados espectrais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.1, p.401-413, 1999.

DONGLI, S.; MING'AN, S.; WEI, H. U.; YU, S. Variability of soil water-physical properties in a small catchment of the Loess Plateau, China. **African Journal Agriculture Research**, Nairobi, v.5, n.4, p.3041-3049, 2010.

DOS SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. **Manual de descrição e coleta de solos no campo**. 5.ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005.186p.

DUFFERA, M.; WHITE, J. G.; WEISZ, R. Spatial variability of Southeastern U.S. Coastal Plain soil physical properties: Implications for site-specific management. **Geoderma**, Amsterdam, v.137, n.6, p.327-339, 2007.

EFETHA, A.; HARMS, T.; BANDARA, M. Irrigation management practices for maximizing seed yield and water use efficiency of Othello dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in southern Alberta, Canada. **Irrigation Science**, New York, v.29, n.3, p.103-113, 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, CNPS, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Nível de aceitabilidade da cultivar de feijão "pérola": avaliação preliminar. **Embrapa documentos**. 98. ed. Santo Antônio de Goiás, 1999. 21p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Adensamento e compactação de solos irrigáveis na zona semi-árida do nordeste Brasileiro. **Circular Técnica**. 38 ed. Recife-PE, 2007. 8p.

FARACO, M. A.; URIBE-OPAZO, M. A.; SILVA, E. A. A.; JOHANN, J. A.; BORSSOI, J. A. Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.32, n. 2, p.463-476, 2008.

FREDDI, O. S.; CARVALHO, M. P.; CENTURION, J. F.; BARBOSA, G. F. Variabilidade espacial da produtividade do feijão em um Latossolo Vermelho distroférrico sob preparo convencional e plantio direto. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.27, n.2, p.61-67, 2005.

FUGIWARA, M.; KURACHI, S. A. H.; ARRUDA, F. B.; PIRES, R. C. M.; SAKAI, E. **A técnica de estudo de raízes pelo método do trado**. Campinas: Instituto Agronômico, p.9, 1994. (Boletim Técnico, 153).

GESSLER, P. E.; CHADWICK, O. A.; CHAMRAN, F.; ALTHOUSE, L.; HOLMES, K. Modeling soil-landscape and ecosystem properties using terrain attributes. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.64, n.4, p.2046-2056, 2000.

GOLDEN SOFTWARE INC. (Golden, Estates Unites). **Surfer for windows: release 7.0, contouring and 3D surface mapping for scientist's engineers user's guide**. New York, 1999. 619p.

GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V. Correlação espacial entre retenção de água e textura do solo para fins de manejo de irrigação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.22, n.3, p.296-303, 2002.

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

GUIMARÃES, C. M.; STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro - II: Efeito sobre o desenvolvimento radicular e da parte aérea. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.6, p.213-218, 2002.

GURBANOV, E. A. Soil degradation due to erosion and furrow irrigation. **Eurasian Soil Science**, Moscow, v.43, n.12, p.1387-1393, 2010.

HAAN, C. T.; BARFIELD, B. J.; HAYES, J. C. **Design hydrology and sedimentology for small catchments**. San Diego: Academic Press, 1994. 578p.

HAIRSINE, P. B.; ROSE, C. W. Rainfall detachment and deposition: sediment transport in the absence of flow-driven processes. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.55, n.5, p.320-324, 1991.

HANZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.82, n.5, p.121-145, 2005.

HATTAR, B. I.; TAIMEH, A. Y.; ZIADAT, F. M. Variation in soil chemical properties along toposequences in an arid region of the Levant. **Catena**, Amsterdam, v.83, n.1, p.34-45, 2010.

HELALIA, A. M.; LETEY, J.; GRAHAM, R. C. Crust formation and clay migration effects on infiltration rate. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.52, n.1, p.251-255, 1998.

HICKMAN, C.; DA COSTA, M. L.; SHAEFER, C. E. G. E.; FERNANDES, R. B. A. Morfologia e estabilidade de agregados superficiais de um Argissolo Vermelho-Amarelo sob diferentes manejos de longa duração e mata atlântica secundária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, n.3, p.2191-2198, 2011.

INFORZATO, R.; MIYASAKA, S. Sistema radicular do feijoeiro em dois tipos de solo do estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v.22, n.2, p.477-481, 1963.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. Indicadores IBGE, Brasília, 2010. Disponível em http://www.ibge. gov.br.

IQBAL, J.; READ, J. J.; THOMASSON, A. J.; JENKINS, J. N. Relationships between Soil-landscape and dryland cotton lint yield. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.69, n.4, p.872-882, 2005.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied geoestatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561p.

JABRO, J. D.; STEVENS, W. B.; EVANS, R. G.; IVERSEN W. M. Spatial variability and correlation of selected soil properties in the Ap horizon of a CRP grassland. **American Society of Agriculture and Biology Engineers**, St. Joseph, v.26, n.3, p.419-428, 2010.

JACKSON, M. L. **Soil chemical analysis: Advanced course**, 3. Madison: Department of Soil University of Wisconsin, 1979. 895p.

JIANG, P.; THELEN, K. D. Effect of soil and topographic properties on crop yield in a north-central corn-soybean cropping system. **Agronomy Journal**, Madison, v.96, n.5, p.252-258, 2004.

KELLOG, C. E. **The place of laboratory in soil classification and interpretation**. Washington: USDA/Soil Conservation Service, 1962. 21p.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society Agronomy, 1965. p.499-510.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relações solo-planta**. Piracicaba: Agronômica Ceres, 1979. 264p.

KITAMURA, A. E.; CARVALHO, M. P.; LIMA, C. G. R. Relação entre a variabilidade espacial das frações granulométricas do solo e a produtividade do feijoeiro sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.2, p.361-369, 2007.

KLEIN, V. A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T. Indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico típico sob plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.39, n.9, p.2475-2481, 2009.

KRAVCHENKO, A. N.; BULLOCK, D. G.; BOAST, C. W. Joint multifractal analysis of crop yield and terrain slope. **Agronomy Journal**, Madison, v.92, n.2, p.1279-1290, 2000.

KRAVCHENKO, A. N.; BULLOCK, D. G. Spatial variability of soybean quality data as a function of field topography: I. Spatial data analysis. **Crop Science**, Madison, v.42, n.5, p.804-815, 2002.

KUMHALOVA, J.; KUMHALA, F.; KROULIK, M.; MATEJKOV, S. The impact of topography on soil properties and yield and the effects of weather conditions. **Precision Agriculture**, New York, v.18, n.1, p.1-18, 2011.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: Editora UNESP, 2003. 253p

LEVANTAMENTO DA PRODUÇÃO AGRÍCOLA NO ESTADO DE GOIÁS, FEIJÃO. **Secretária de gestão e planejamento do estado de Goiás** (SEGPLAN), 2012. 21p.

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**, Lavras, v.34, n.1, p.121-131 2010.

LEGOUT, C.; LEGUÉDOIS, S.; BESSIONNAIS, L.; ISSA, M. Splash distance and size distributions for various soils. **Geoderma**, Amsterdam, v.124, n.3, p.279-292, 2005.

LEITNER, D.; KLEPSCH, S.; PTASHNYK, M.; MARCHANT, A.; KIRK, G. J. D.; SCHNEPF, A.; ROOSE, T. A. Dynamic model of nutrient uptake by root hairs. **New Phytologist**, New Jersey, v.185, n.5, p.792-802, 2009.

LEVY, G. J.; EISENBERG, H.; SHAINBERG, I. Clay dispersion as related to soil properties and water permeability. **Soil Science**, Baltimore, v.155, n.1, p.15-22, 1993.

LIMA, C. L. R.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S. C.; LEÃO, T. P. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo a partir da avaliação da resistência à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, p.217-223, 2006.

LIMA, C. L R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E.; AKIYOSHI S. Produtividade de culturas e resistência à penetração de Argissolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, n.1, p.89-98, 2010.

LITTLE, T. M.; HILLS, F. J. **Agricultural experimentation: design and analysis**. New York: John Wiley & Sons, 1978. 368p.

MARTINS, M. V.; CARVALHO, M. P.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R. Correlação linear e espacial entre a produtividade do feijoeiro e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférrico de Selvíria, Estado de Mato Grosso do Sul. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.31, n.2, p.147-154, 2009.

MASSIGNAM, A. M.; ANGELOCCI, L. R. Relações entre temperatura do ar, disponibilidade hídrica no solo, foto-período e duração de sub-períodos fenológicos do girassol. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.1, n.1, p.63-69, 1993.

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**, Viçosa, v.32, n.2, p.781-788, 2008.

MESTAS, R. M.; ROQUE, M. W.; MATSURA, E. E.; BIZARY, D. R.; PAZ, A. Variabilidad espacial de los atributos físico-hídricos del suelo y de la productividad del cultivo de fréjol

(*Phaseolus Vulgaris* L.) irrigado bajo un sistema de siembra directa. **Revista de Ciências Agrárias**, Portugal, v.33, n.3, p.307-313, 2010.

MIAO, Y.; MULLA, D. J.; ROBERT, P. C. Spatial variability of soil properties, corn quality and yield in two Illinois, USA fields: implications for precision corn management. **Precision Agriculture**, New York, v.7, n.5, p.5-20, 2006.

MICHELON, C. J.; CARLESSO, R.; PETRY, M. T.; MELO, G. L.; SPOHR, R. B.; ANDRADE, J. G. Qualidade física dos solos irrigados de algumas regiões do Brasil Central. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.1, p.39-45, 2009.

MILDE, G. A.; DEDECEK, R. A.; GAVA, J. L. Diâmetro médio ponderado de partículas para estimativa de propriedades físico-hídricas dos solos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v.32, n.3, p.1-22, 2008.

MIQUELONI, D. P.; BUENO, C. R. P. Análise multivariada espacial na estimativa de erodibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, n.6, p.2175-2182, 2011.

MONTAGU, K. D.; CONROY, J. P.; ATWELL, B. J. The position of localized soil compaction determines root and subsequent shoot growth responses. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.52, n.364, p.2127-2133, 2001.

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**, Viçosa, v.34, n.3, p.1811-1822, 2010.

MUNOZ-PEREA, C. G.; ALLEN, R. G.; WESTERMANN, D. T.; WRIGHT, J. L.; SINGH, S. P. Water use efficiency among dry bean landraces and cultivars in drought-stressed and non-stressed environments. **Euphytica**, Amsterdam, v.3, n.155, p.393-402, 2007.

NEYKOVA, N.; OBANDO, J.; SCHNEIDER, R.; SHISANYA, C.; THIELE-BRUNH, S.; THOMAS, F. M. Vertical root distribution in single-crop and intercropping agricultural systems in Central Kenya. **Journal Plant of Nutrition Soil Science**, Malden, v.174, n.4 p.742-749, 2011.

NIPPERT, J. B.; OCHELTREE, T. W.; SKIBBE, A. M.; ARNOLD, K. B. S.; BRUNSELL, N. A. Linking plant growth responses across topographic gradients in tall grass prairie. **Oecologia**, New York, v.12, n.3, p.1-12, 2011.

NORTHUP, B. K.; DANIEL, J. A. Distribution of soil bulk density and organic matter along an elevation gradient in central Oklahoma. **ASABE**, Saint Joseph, v.53, n.4, p.1749-1757, 2010.

OLEA, R. A. **Optimum mapping techniques using regionalized variable theory**. Lawrence: University of Kansas, 1975. 137p. (Series on Spatial Analysis, 2).

OLIVEIRA, J. B. DE, JACOMINE, P. K. T., CAMARGO, M. N. **Classes gerais de solos do Brasil. Guia auxiliar para seu reconhecimento**. 2.ed. Jaboticabal: FUNEP/UNESP. 1992. 201p.

OLIVEIRA, E.; MEDEIROS, G. B.; MARUN, F.; OLIVEIRA, J. C.; SÁ, J. P. G.; COLOSSI F. A.; KRANZ, W. M.; SILVA JUNIOR, N. F.; ABRAHÃO, J. J. S.; GUERINI, V. L.; MARTIN, G. L. **Recuperação de pastagens no noroeste do Paraná: bases para o plantio direto e integração lavoura e pecuária**. Londrina, IAPAR, 2000. 96p. (IAPAR, Informe de Pesquisa, 134)

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**. 2003. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz-ESALQ/USP. Piracicaba, 2003.

ORJUELA-MATA, H.M.; SANABRIA, Y.R.; CAMACHO TAMAIO, J.H. Spatial analyses of infiltration in a oxisoil of the estern plains of Colombia. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v.72, n.3. p.404-410. 2012.

PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W. J. Soil structure and pedotransfer functions. **European Journal of Soil Science**, New Jersey, v.54, n.5, p.443-451, 2003.

POLYAKOV, V.; LAL, R. Modeling soil organic matter dynamics as affected by soil water erosion. **Environment International**, Berlin, v.30, n.4, p.126-136, 2004

PRADO, H. **Ambientes de produção de cana-de-açúcar na região Centro-sul do Brasil**. Reunião Brasileira de Conservação da Água e do Solo. Cuiabá, 2003.

RACHMAN, A.; ANDERSON, S. H.; GANTZER, C. J.; THOMPSON, A. L. Influence of long-term cropping systems on Soil physical properties related to soil erodibility. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.67, n.5, p.637-644, 2003.

RENGASAMY, P. Clay dispersion in relation to changes in the electrolyte composition of dialyzed red-brown earths. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.34, n.3, p.723-732, 1983.

RIBEIRO JUNIOR, P. J. **Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros de solo**. Dissertação (Mestrado em estatística e Experimentação Agronômica) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

RIBEIRO, K. D.; MENEZES, S. M.; MESQUITA, M. G. B. F.; SAMPAIO, F. M. T. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.31, n.4, p.1167-1175, 2007.

ROBERTSON, G. P. GS^{+}: Geostatistics for the Environmental Sciences. **Gamma Design software, Plainwell**, Michigan, p.152, 1998.

ROQUE, M. W.; MATSURA, E. E.; SOUZA, Z. M.; BIZARI, D. R.; SOUZA, A. L. Correlação linear e espacial entre a resistência do solo ao penetrômetro e a produtividade do feijoeiro irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.3, p.1827-1835, 2008.

ROSSI, R. E.; DURIGAN, J. L.; BECK, L. R. Kriging in the shadows: geoestatistical interpolation for remote sensing. **Remote Sensing Environmental**, Madison, v.49, n.3 p.32-40, 1994.

RUTH, B.; LENNARTZ, B. Spatial variability of soil properties and rice yield along two catenas in southeast China. **Pedosphere**, Nanjing, v.18, n.4, p.409-420, 2008.

SALVIANO, A. A. C.; VIEIRA, S. R.; SPAROVEK, G. Variabilidade espacial de atributos de solo e de *crotalaria juncea* L. em área severamente erodida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.3, p.115-122, 1998.

SANCHEZ, P. A. **Properties and management of soils in the tropics**. New York: John Wiley & Sons, 1976. 618p.

SANCHEZ, R. B.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M. Variabilidade espacial de propriedades de Latossolo e da produção de café em diferentes superfícies geomórficas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, n.4, p.489-495, 2005.

SANTOS, D.; SOUZA, E. G.; NÓBREGA, L. H. P.; BAZZI, C. L.; GONÇALVES JUNIOR, A. C. Variabilidade espacial de um Latossolo Vermelho após cultivo de soja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.8, p.1415-1425, 2012.

SCHAFFRATH, V. R.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; GONÇALVES, A. C. A. Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.4, p.1396-1377, 2008.

SCHERPINSKI, C.; URIBE-OPAZO, M. A; BOAS, M. A. V.; SAMPAIO, S. C.; JOHANN, J. A. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da infiltração da água no solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.32, n.1, p.1-7, 2010.

SCHLOTZHAVER, S. D.; LITTELL, R. C. SAS: **system for elementary statistical analysis**. 2.ed. Cary, 1997. 905p.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.58, n.3, p.1775-1781, 1994.

SILVA, A. J. N.; RIBEIRO, M. R.; MERMUT, A. R.; BENKE, M. B. Influência do cultivo contínuo da cana-de-açúcar em Latossolo Amarelos coesos do Estado de Alagoas: propriedade micromorfológicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.3, p.515-525, 1998.

SILVA, F. F.; FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; ARATANI, R. G.; ANDRIOLI, F. F.; ANDRIOLI, I. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho cultivado no sistema plantio direto. **Irriga**, Botucatu, v.13, n.2, p.191-204, 2009.

SILVA, J. R. M.; SILVA, L. L. Relationship between distance to flow accumulation lines and spatial variability of irrigated maize grain yield and moisture content at harvest. **Biosystems Engineering**, Columbus, v.94, n.4, p.525-533. 2006.

SILVA, J. R. M.; SILVA, L. L. Evaluation of the relationship between maize yield spatial and temporal variability and different topographic attributes. **Biosystems Engineering**, Columbus, v.28, n.2, p.183-190, 2008.

SIQUEIRA, G. M. **Variabilidade de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos**. Campinas, 2006. Dissertação de mestrado do Instituto Agronômico de Campinas.86p.

SOIL SURVEY DIVISION STAFF (1993). **Soil Survey Manual. Agricultural Handbook** n.18. USDA-NRCS. Washington: US Government Printing Office, 438p.

SORACCO, C. G.; LOZANO, L. A.; BALBUENAI, R.; RESSIA, J. M.; FIGUEIRA, R. R. Contribution of macroporosity to water flux of a soil under different tillage systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, n.4, p.815-825, 2012.

SOUZA, C. M. A.; RAFULL, L. Z. L.; VIEIRA, L. B. Determinação do limite de liquidez em dois tipos de solo, utilizando-se diferentes metodologias. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande**,** v.4, n.3, p.460-464, 2000.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. BARBIERI, D.M. Variabilidade espacial da textura de um Latossolo Vermelho eutroférrico sob cultivo de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n.2, p. 309-319, 2004.

SOUZA, Z.M; SILVA, M.L.S ; GUIMARÃES, G.L; CAMPOS,D.T.S; CARVALHO, M.P; PEREIRA, G.T . Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho distrófico sob semeadura direta em Sevíria (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.3, p. 699-707, 2001.

SOUZA, C. K.; MARQUES JUNIOR, J.; MARTINS FILHO, M. V.; PEREIRA, G. T. Influência do relevo na variação anisotrópica dos atributos químicos e granulométricos de uma latossolo em Jaboticabal-SP. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.23, n.3, p.486-495, 2003.

SOUZA, Z. M.; CERRI, D. G. P.; MAGALHÃES, P. S. G.; CAMPOS, M. C. C. Correlação dos atributos físicos e químicos do solo com a produtividade de cana-de-açúcar. **Revista Biologia e Ciências da Terra**, Campina Grande, v.8, n.2, p.183-189, 2008.

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 de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.4, p. 533-542, 2004.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; TOMM, G. O. Efeito de pastagens de inverno e de verão em características físicos do solo, sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.4, p.1193-1200, 2006.

SPERA, S. T., SANTOS, H. P., FONTANELI, R. S., TOMM, G. O. Integração lavoura e pecuária e os atributos físicos de solo manejado sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v.33, n.3, p.129-136, 2009.

SPOSITO, G. **The aims of soil science-challenges to be taken up by soil science – The applications and benefits of soil science**. In: World Congress of Soil Science, 16, Montpellier-França. Anais-Montpellier:International Society of Soil Science, p.41-48,1998.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.15, n.3, p.229-235, 1991.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo na compactação do solo, disponibilidade hídrica e comportamento do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** Brasília, v.34, n.1, p.83-91, 1999.

STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.2, p.207-212, 2002.

STONE, L. F.; FERREIRA, E. P. B.; DIDONET, A. D.; HEINEMAM, A. B.; OLIVEIRA, J. P. Correlação entre produtividade do feijoeiro no sistema orgânico e atributos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.17, n.1, p.19-25, 2013.

STRECK, C. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.4, p.755-760, 2004.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G. M. C.; GUIMARÃES, M. F.; FONSECA, I. C. B. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.2, p.725-730, 2001.

TAVARES FILHO, BARBOSA J.; CESARE, G.M.; RIBON, A.A. Physical properties of dystrophic Red Latosol (Oxisol) under different agricultural uses. **Revista. Brasileira de. Ciência do. Solo**, Viçosa, v.34, n.3, p.925-933, 2010.

TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Effects of different management systems on porosity of oxisols in Paraná, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.3, p.899-906, 2010.

TAYLOR, S. A.; ASHCROFT, G. L. **Physical edaphology: the physics of irrigated and no irrigated soils**. San Francisco: W. H. Freeman, 1972. 532p.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geoestatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, Amsterdam, v.38, n.4, p.45-93, 1985.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; WADE, M. K.; UEHARA, G.; SUDJADI, M. Spatial variation of soil properties and rice yield on recently cleared land. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.51, n.3, p.668-74, 1987.

TSUI, C. C.; CHEN, Z. S.; HSIEH, C. Relationships between soil properties and slope position in a lowland rain forest of southern Taiwan. **Geoderma**, Amsterdam, v.123, n.6, p.131-142, 2004.

VALENTIN, C.; BRESSON, L. M. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. **Geoderma**, Amsterdam, v.55, n.2, p.225-245, 1992.

VIEIRA, S. R.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Spatial variability of field-measured infiltration rate. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.45, n.6, p.1040-1048, 1981.

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v.51, n.3, p.1-75, 1983.

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

VIEIRA, M. L.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.3, p.1271-1280, 2007.

VIEIRA, S. R.; BRANCALIÃO, S. R.; GRECO, C. R.; MARTINS, A. L. M. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com leguminosas consorciada com seringueira. **Bragantia**, Campinas, v.69, n.2, p.423-432, 2010.

VIEIRA, S. R.; DECHEN, S. C. F.; SIQUEIRA, G. M.; DUFRANC, G. Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos relacionados com o estado de agregação de dois Latossolos cultivados no sistema de semeadura direta. **Bragantia**, Campinas, v.70, n.1, p.185-195, 2011.

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

WIJAYA, K.; NISHIMURA, T.; SETIAWAN, B. I.; SAPTOMO, S. K. Spatial variability of soil saturated hydraulic conductivity in paddy field in accordance to subsurface percolation. **Paddy Water Environmental**, Berlin, v.8, n.6, p.113-120, 2010.

WILDING, L.P.; DRESS, L.R. Spatial variability and pedology. In: WILDING, L.P.; SMECK, N.E. and HALL, G.F. (eds) **Pedogenesis and soil taxonomy**, Amesterdam, v.36, n.3, p.83-117, 1983.

WUTKE, E. B.; ARRUDA, F. B.; FRANCELLI, A. L.; PEREIRA, J. C. V. N. A.; FUGIWARA, M.; AMBROSANO, G. M. B. Propriedades do solo e sistema radicular do feijoeiro irrigado em rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.5, p.621-633, 2000.

YONG, B.; REN, L.; YANG, X.; ZHANG, W.; CHEN, X.; XIONG, L.; JIANG, S. A new GIS-based algorithm for computing the TOPMODEL topographic index. **The National Geophysical Research Institute**, Beijing, v.331, p.395-401, 2009.

YU, T. R. **Chemistry of variable charge soils**. 1.ed. New York: Oxford University Press, 1997. 505p.

ZEBARTH, B. J.; JONG, E. Water flow in a hummocky landscape in central Saskatchewan, Canada, I. Distribution of water and soils. **Journal of Hydrology**, Columbus, v.107, n.5, p.309-327, 2003.

ZHANG, S.; ZHANG, X.; HUFFMAN T.; LIU, X.; YANG, J. Influence of topography and land management on soil nutrients variability in Northeast China. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Berlin, v.89, n.4, p.427-438, 2011.