

**UFRRJ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
AGRÍCOLA E AMBIENTAL**

DISSERTAÇÃO

**DEFINIÇÃO DE ZONAS DE MANEJO PARA PASTAGEM E
PRODUÇÃO DE BANANA COM BASE EM ATRIBUTOS DO
SOLO E USO DE GEOESTATÍSTICA**

EUDOCIO RAFAEL OTAVIO DA SILVA

2021



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
E AMBIENTAL**

**DEFINIÇÃO DE ZONAS DE MANEJO PARA PASTAGEM E
PRODUÇÃO DE BANANA COM BASE EM ATRIBUTOS DO SOLO E
USO DE GEOESTATÍSTICA**

EUDOCIO RAFAEL OTAVIO DA SILVA

Sob a Orientação do Professor

Dr. Marcos Gervasio Pereira

e Co-orientação do Professor

Dr. Murilo Machado de Barros

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola e Ambiental**, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental, Área de Concentração em Sistemas Agrícolas.

Seropédica, RJ
Fevereiro de 2021

É permitida a cópia parcial ou total desta Dissertação, desde que seja citada a fonte.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – código de financiamento 001.

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S586d Silva, Eudocio Rafael Otavio da , 1994-
Definição de zonas de manejo para pastagem e
produção de banana com base em atributos do solo e uso
de geostatística / Eudocio Rafael Otavio da Silva.
Seropédica - RJ, 2021.
92 f.: il.

Orientador: Marcos Gervasio Pereira.
Coorientador: Murilo Machado de Barros.
Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola e Ambiental, 2021.

1. espacialização de atributos do solo. 2.
resistência do solo a penetração. 3. substâncias
húmicas. 4. Tifton 85. 5. banana 'BRS Princesa'. I.
Pereira, Marcos Gervasio, 1965-, orient. II. Machado
de Barros, Murilo, 1983-, coorient. III Universidade
Federal Rural do Rio de Janeiro. Pós-Graduação em
Engenharia Agrícola e Ambiental. IV. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E
AMBIENTAL**

EUDOCIO RAFAEL OTAVIO DA SILVA

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental – PGEAAmb, como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Agrícola e Ambiental**, tendo como Área de Concentração Sistemas Agrícolas.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 19/02/2021

Conforme deliberação número 001/2020 da PROPPG, de 30/06/2020, tendo em vista a implementação de trabalho remoto e durante a vigência do período de suspensão das atividades acadêmicas presenciais, em virtude das medidas adotadas para reduzir a propagação da pandemia de Covid-19, nas versões finais das teses e dissertações as assinaturas originais dos membros da banca examinadora poderão ser substituídas por documento(s) com assinaturas eletrônicas. Estas devem ser feitas na própria folha de assinaturas, através do SIPAC, ou do Sistema Eletrônico de Informações (SEI) e neste caso a folha com a assinatura deve constar como anexo ao final da tese / dissertação.

Membros da Banca:

Marcos Gervasio Pereira. Dr. UFRRJ (Orientador/Presidente da banca).

Nivaldo Schultz. Dr. UFRRJ.

Flávio Castro da Silva. Dr. UFF.



Emitido em 19/02/2021

HOMOLOGAÇÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 18/2021 - IT (12.28.01.27)
(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 08/03/2021 13:13)

MARCOS GERVASIO PEREIRA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptS (12.28.01.00.00.33)
Matrícula: 1060711

(Assinado digitalmente em 08/03/2021 14:33)

NIVALDO SCHULTZ
CHEFE DE DEPARTAMENTO - TITULAR
CHEFE DE UNIDADE
DeptS (12.28.01.00.00.33)
Matrícula: 2136627

(Assinado digitalmente em 08/03/2021 13:06)

FLÁVIO CASTRO DA SILVA
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 056.776.696-95

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sipac.ufrrj.br/documentos/> informando seu número: **18**, ano: **2021**, tipo: **HOMOLOGAÇÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**, data de emissão: **08/03/2021** e o código de verificação: **43799ecf9f**

À minha família e aos que deixaram muitas saudades: avó Dazinha, avô Nonato, tio Valdemar, Katiane, tia Socorro e Bethoven.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Antonio Eunazio e Gracilene Barbosa, por compreenderem e apoiarem os meus sonhos. Aos meus irmãos, Gabriel Augusto e Yasmin Barbosa, aos meus avós maternos, Osmerinda e Ourofino Barbosa, e a todos os meus familiares, obrigado por tudo.

Aos meus amigos, namorado e à toda família Ruralina, por todo o apoio, alegrias e suporte psicológico ao longo desses anos.

Aos meus orientadores, Marcos Gervasio Pereira e Murilo Machado de Barros, por me darem uma oportunidade, por tornarem o universo da Pós-Graduação um lugar que eu pudesse me sentir pertencido e por todos os ensinamentos ao longo desses anos na Universidade, muito obrigado.

À toda equipe que colaborou no desenvolvimento desta pesquisa em campo e em laboratório, Gabriele Oliveira, André Sousa, Patrícia Tavares, Sandro (topógrafo), Luiz Carlos (Mineiro), Thaís Machado, Thaís Monteiro e Guilherme Silva, não seria possível sem vocês.

À Feno Rio e ao Setor de Horticultura da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro e a todos os seus funcionários por disponibilizarem áreas experimentais para o desenvolvimento das pesquisas científicas.

Ao Laboratório de Gênese e Classificação do Solo e ao Laboratório de Indicadores Edafo-Ambientais, inclusive a todos os pesquisadores atuantes nos mesmos por me receberem, incluírem, pelo acolhimento no ambiente de trabalho e por todos os ensinamentos e dicas de laboratório, com certeza sentirei saudades.

À Escola Municipal Giovanni Zanni (Ensino Fundamental), ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão-IFMA (Ensino Médio) e à Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (Graduação e Mestrado) pelo ensino público de qualidade e por tornarem os meus sonhos realidade.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental (PGEAAMB) pela oportunidade de especialização na área que amo e por toda colaboração na minha formação profissional, grato a todos os funcionários, professores e pesquisadores.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) e a FAPERJ pelo apoio pelo financiamento deste trabalho.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) pelos ensinamentos ao longo destes anos e pela oportunidade de viver a Universidade além das minhas expectativas, muito obrigado por essa jornada.

RESUMO GERAL

SILVA, Eudocio Rafael Otavio da. **Definição de zonas de manejo para pastagem e produção de banana com base em atributos do solo e uso de geoestatística**. 2021. 92p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2021.

O objetivo deste estudo foi avaliar a variabilidade espacial de parâmetros químicos, físicos e das frações da matéria orgânica em solos cultivados com Tifton 85 e banana BRS Princesa e caracterizá-los em zonas de manejo. Os experimentos foram realizados em áreas localizadas na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica-RJ, em cultivo de Tifton 85 na Fazenda Feno Rio e no Setor de Horticultura em cultivo da banana BRS Princesa. Para a área da Tifton 85, realizou-se a coleta de 50 pontos em malha irregular e retirou-se amostras de terra deformadas nas profundidades de 0-0,20 e 0,20-0,40 m. Obteve-se os dados sobre a soma de bases trocáveis (SB), capacidade de troca de cátions total (Valor T), saturação por bases (V%), matéria orgânica (MO), argila total, areia total, silte, carbono na fração de ácido fúlvico (C-FAF), fração de ácido húmico (C-FAH), fração de humina (C-HUM), carbono particulado (COP), carbono associado aos minerais (COam), matéria orgânica leve (MOL, teor de C e N), estimativa da massa fresca (MF) da Tifton 85 e a necessidade de calagem (NC) à taxa fixa e variável para a profundidade de 0-0,20 m. Para a área das bananeiras realizou-se coletas de 60 pontos georreferenciados e foram coletadas amostras de terra deformadas em 0-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m. Realizou-se as análises dos atributos do solo pH, Ca, Mg, Al, Na, K, P, H + Al, SB, Valor T, V%, frações de areia total, argila total e silte, carbono orgânico total (COT), COP e COam (em 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m), resistência do solo a penetração (RSP) e umidade gravimétrica do solo. A RSP foi obtida a partir do índice de cone (IC) utilizando-se um penetrômetro de impacto e mensurou-se o IC até a profundidade de 0,40 m. Os dados foram submetidos à análise exploratória e estatística descritiva, seguidos do estudo geoestatístico em que cada variável foi submetida a modelagem de semivariograma teórico e krigagem ordinária, obtendo-se os mapas de variabilidade espacial. Realizou-se análise multivariada para o delineamento das zonas de manejo (ZM) a partir da análise de componentes principais (PCA) seguidas do método k-médias. Na área cultivada com a Tifton 85 a distribuição espacial das frações da matéria orgânica do solo sugere maiores teores nas regiões de alta probabilidade de ocorrência de maiores produtividades da cultura. Na área de cultivo da banana BRS Princesa, as relações espaciais dos nutrientes disponíveis no solo indicam haver desbalanço nutricional. Os valores da RSP avaliados no bananal sugerem maior compactação em subsuperfície. Verificando-se prejuízos as bananeiras e devendo ser realizados manejos que melhorem as condições edáficas do bananal, como a subsolagem localizada em profundidade variada. Foi possível gerar duas ZM para as diferentes áreas experimentais para fins de recomendação de adubação. Verificou-se que o manejo localizado com a aplicação de adubação orgânica pode ser indicado, devendo ser aplicado maiores doses em uma ZM quando comparada à outra, visto a maior necessidade de incremento de matéria orgânica no solo em locais específicos das áreas experimentais.

Palavras-chave: espacialização de atributos do solo, resistência do solo a penetração, substâncias húmicas.

GENERAL ABSTRACT

SILVA, Eudocio Rafael Otavio da. **Definition of management zones for pasture and banana production based on soil attributes and use of geostatistics.** 2021. 84p. Dissertation (Master Science in Agricultural and Environmental Engineering). Institute of Technology, Engineering Department, Rural Federal University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2021.

The aim of this study was to evaluate the spatial variability of chemical and physical parameters and fractions of organic matter in soils cultivated with Tifton 85 and banana BRS Princesa and characterize them in management zones. The experiments were carried out in areas located at the Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica-RJ, in cultivation of Tifton 85 at Fazenda Feno Rio and in the Horticulture Sector in banana cultivation BRS Princesa. For the Tifton 85 area, 50 points were collected in irregular mesh and deformed soil samples were taken at depths of 0-0.20 and 0.20-0.40 m. Data on the sum of exchangeable bases (SB), total cation exchange capacity (T value), base saturation (V%), organic matter (MO), total clay, total sand, silt, carbon in the fuvic acid fraction (C-FAF), humic acid fraction (C-FAH), humine fraction (C-HUM), particulate carbon (COp), mineral-associated carbon (COam), light organic matter (MOL, content of C and N), estimation of fresh mass (MF) of Tifton 85 and the need for liming (NC) at a fixed and variable rate for a depth of 0-0.20 m. For the banana area, 60 georeferenced points were collected and samples of deformed soil were collected at 0-0.05, 0.05-0.10, 0.10-0.20 and 0.20-0.40 m. Soil attributes were analyzed pH, Ca, Mg, Al, Na, K, P, H + Al, SB, T value, V%, fractions of total sand, total clay and silt, total organic carbon (COT), COp and COam (at 0-0.05, 0.05-0.10 and 0.10-0.20 m), soil resistance to penetration (RSP) and gravimetric soil moisture. The RSP was obtained from the cone index (CI) using an impact penetrometer and the CI was measured to a depth of 0.40 m. The data were submitted to exploratory analysis and descriptive statistics, followed by the geostatistical study in which each variable was subjected to modeling of theoretical semivariogram and ordinary kriging, obtaining spatial variability maps. Multivariate analysis was performed to design the management zones (MZ) based on the principal component analysis (PCA) followed by the k-means method. In the area cultivated with Tifton 85, the spatial distribution of fractions of organic matter in the soil suggests higher levels in regions with a high probability of occurrence of higher crop yields. In the cultivation of the BRS Princesa banana, the spatial relationships of the nutrients available in the soil indicate a nutritional imbalance. The RSP values evaluated in the bananal suggest greater compaction in the subsurface. If the banana trees are damaged and management must be carried out to improve the edaphic conditions of the banana plantation, such as subsoiling located at a different depth. It was possible to generate two MZ for the different experimental areas for the purpose of fertilization recommendation. It was found that localized management with the application of organic fertilizer can be indicated, and higher doses should be applied in one MZ when compared to the other, given the greater need to increase organic matter in the soil in specific places in the experimental areas.

Key-words: spatialization of soil attributes, soil resistance to penetration, humic substances.

SUMÁRIO

RESUMO GERAL	viii
GENERAL ABSCTRACT	ix
INTRODUÇÃO GERAL	1
CAPÍTULO I: DEFINIÇÃO DE ZONAS DE MANEJO DE PASTAGEM COM BASE EM ATRIBUTOS DO SOLO E USO DE GEOESTATÍSTICA	4
RESUMO	5
ABSCTRACT	6
1 INTRODUÇÃO	7
2 MATERIAL E MÉTODOS	9
2.1 Área de Estudo.....	9
2.2 Análise dos Atributos e Construção do Banco de Dados.....	9
2.3 Estatística Descritiva e Geoestatística.....	10
2.4 Análise Multivariada e Geração das Zonas de Manejos (ZM).....	12
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	14
3.1 Variabilidade Espacial dos Atributos do Solo e da Cultura.....	14
3.2 Zonas Homogêneas Para a Recomendação de Calagem.....	23
3.3 Zonas de Manejo (ZM).....	27
4 CONCLUSÕES	31
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32
CAPÍTULO II: DELINEAMENTO DE ZONAS DE MANEJO NA PRODUÇÃO DE BANANA COM BASE NA VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO DE BAIXA FERTILIDADE NATURAL	37
RESUMO	38
ABSCTRACT	39
1 INTRODUÇÃO	40
2 MATERIAL E MÉTODOS	42
2.1 Área Experimental e Histórico.....	42
2.2 Coleta dos Dados em Campo e Análise Laboratorial.....	42
2.3 Estatística Descritiva e Geoestatística.....	43
2.4 Geração das Zonas de Manejo por Meio da Análise Multivariada.....	45
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
3.1 Variabilidade Espacial dos Atributos do Solo.....	46
3.2 Zonas de Manejo (ZM).....	57
4 CONCLUSÕES	62
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
CAPÍTULO III: INVESTIGAÇÃO ESPACIAL DA RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO E SEUS IMPACTOS EM CULTIVO DA BANANEIRA ‘BRS PRINCESA’	68
RESUMO	69
ABSCTRACT	70
1 INTRODUÇÃO	71
2 MATERIAL E MÉTODOS	73
2.1 Descrição da Área de Estudo e Histórico.....	73
2.2 Geração do Banco de Dados Georreferenciados.....	73
2.3 Estatísticas, Geoestatísticas e Geração dos Mapas de Variabilidade Espacial.....	75
2.4 Mapeando a Subsolagem em Profundidades Variadas.....	76
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
4 CONCLUSÕES	87

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88
CONCLUSÕES GERAIS.....	92

INTRODUÇÃO GERAL

O Rio de Janeiro é um dos estados brasileiros de menor representatividade econômica na produção agropecuária (SOUZA, 2019), entretanto as atividades agrícolas desenvolvidas são de fundamental importância no cenário econômico, social e ambiental do sudeste brasileiro.

No contexto das áreas de pastagens, entende-se que a intensa exploração dos solos no Rio de Janeiro como fora em outrora, sobretudo nos séculos XVIII e XIX, resultaram em grandes extensões de pastagem em algum grau de degradação (DEVIDE et al., 2014). Tal fato indica que devem ser planejadas formas de manejo de pastagens que visem a recuperação e manutenção destes solos.

No tocante a fruticultura fluminense, observa-se que o grande mercado consumidor aliado à diversidade climática no estado demonstra potencial para os agricultores, sobretudo para a cultura da banana, a qual rendeu cerca de R\$ 125 milhões em faturamento bruto Estadual em 2018 (EMATER-RIO, 2019). A lucratividade observada indica que são imprescindíveis a implementação de manejos do solo e da cultura associado a tecnologias que aumentem o potencial produtivo da fruticultura, em especial o cultivo da bananeira.

Boa parte dos solos do estado do Rio de Janeiro é formada pela intensa intemperização das rochas e pela deposição de sedimentos, sendo os solos formados comumente ácidos, de baixa fertilidade natural, com valores de saturação por bases naturalmente abaixo de 50% e baixa capacidade de troca catiônica (FREIRE et al., 2013). Aliado a esses fatores, as ações antrópicas, provocadas pelo manejo inadequado do solo, corroboram para o esgotamento dos nutrientes e acentuam os processos erosivos. Desta maneira, é de grande relevância o papel da matéria orgânica do solo (MOS) nos cultivos destas regiões. A MOS contribui no aumento da capacidade de troca catiônica e na manutenção das propriedades químicas e física dos solos (PEREIRA et al., 2019), sendo um dos principais indicadores de qualidade do solo e condicionantes à uma maior produtividade agrícola.

A avaliação da MOS e de atributos do solo em áreas de cultivos agrícolas pode ser realizada a partir do reconhecimento de padrões espaciais do solo e planta utilizando ferramentas presentes na Agricultura de Precisão (AP), como a análise da estatística descritiva, multivariada e a geoestatística, sendo que esta caracteriza-se pela gestão localizada na lavoura. Diferindo da agricultura convencional na qual são considerados os valores médios na lavoura, o estudo em AP leva em consideração a variabilidade espacial existente no campo, verificando-se que os padrões antes considerados homogêneos apresentam heterogeneidade.

A gestão localizada pode ser realizada por uma ampla variedade de métodos presentes no contexto da agricultura digital, como o uso de sensores, veículos aéreos não tripulados (VANTs), uso de imagens de satélite e amostragens de solo georreferenciadas. A investigação espacial de atributos do solo e da cultura por amostragem georreferenciadas constitui-se como um dos métodos mais tradicionais da AP, no qual são obtidos mapas de variabilidade espacial que viabilizam o entendimento das relações de causa e efeito na lavoura e a partir disto podem indicar a aplicação de insumos agrícolas a taxa variável ou gerar zonas de manejo a fim de recomendar manejos localizados em regiões homogêneas do campo.

Diante do exposto, partiu-se da hipótese que as malhas de amostragem georreferenciadas determinadas para as áreas distintas cultivadas com Tifton 85 e banana BRS Princesa no sudeste brasileiro são adequadas para a investigação espacial de atributos do solo por métodos geoestatísticos e multivariados, sendo possível gerar mapas de variabilidade espacial e definir zonas de manejo para fins de recomendação de manejo localizado. O objetivo geral deste estudo foi avaliar a variabilidade espacial de parâmetros químicos, físicos e das frações da matéria orgânica em solos cultivados com banana cultivar BRS Princesa e Tifton 85 e caracterizá-los em zonas de manejo. Para alcançar o objetivo geral, definiu-se os seguintes objetivos específicos:

- Investigar as relações espaciais existentes em áreas distintas cultivadas com Tifton 85 e banana BRS Princesa em relação aos atributos químicos, físicos e da matéria orgânica do solo a partir de abordagem geoestatística, obtendo-se mapas de variabilidade espacial. Além da investigação da variabilidade espacial da resistência do solo a penetração e suas interferências nos atributos do solo em áreas de cultivo da bananeira BRS Princesa;
- Utilizar métodos estatísticos e multivariados na obtenção das zonas de manejo para as áreas experimentais e recomendar manejos localizados que contribuam para a melhoria da qualidade destes solos, aprimorando as práticas culturais na produção e conservação dos solos destas áreas, levando em conta sua dependência espacial.

O presente estudo foi dividido em capítulos, definidos a seguir:

Capítulo I: Definição de zonas de manejo de pastagem com base em atributos do solo e uso de geoestatística.

Capítulo II: Delineamento de zonas de manejo na produção de banana com base na variabilidade espacial de atributos do solo de baixa fertilidade natural.

Capítulo III: Investigação espacial da resistência do solo à penetração e seus impactos em cultivo da bananeira 'BRS Princesa'.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DEVIDE, A. C. P.; CASTRO, C. M.; RIBEIRO, R. L. D.; ABOUD, A. C. S.; PEREIRA, M. G.; RUMJANEK, N. G. Environmental history of the Paulista Paraíba Valley, Brazil. **Revista Biociências**, v. 20, n. 1, p. 12-29, 2014.

EMPRESA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO – EMATER-RIO. **Relatório de atividades anuais 2019**. http://www.emater.rj.gov.br/Relatorio_de_Atividades_2019_20_08_2020.pdf (acesso em 13 jan.2021)

FREIRE, L. R et al. **Manual de calagem e adubação do Estado do Rio de Janeiro**. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa; Seropédica, RJ: Editora Universidade Rural, 2013. 430 p.

PEREIRA, M. G.; PINTO, L. A. S. R.; ROSSI, C. Q.; SANTOS, O. A. Q.; MOURA, O. V. T.; MARTELLETO, L. A. P. Atributos físicos e químicos do solo sob diferentes sistemas de produção em solos de textura arenosa. **Magistra**, v. 30, p. 342-350, 2019.

SOUZA, R. P. O desenvolvimento rural no Estado do Rio de Janeiro a partir de uma análise multidimensional. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 57, n. 1, 2019. <https://doi.org/10.1590/1234-56781806-94790570107>.

CAPÍTULO I: DEFINIÇÃO DE ZONAS DE MANEJO DE PASTAGEM COM BASE EM ATRIBUTOS DO SOLO E USO DE GEOESTATÍSTICA

RESUMO

SILVA, Eudocio Rafael Otavio da. **Definição de zonas de manejo de pastagem com base em atributos do solo e uso de geoestatística**. 2021. 92p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2021.

O presente estudo teve como objetivo indicar manejos localizados em área de pastagem cultivada com Tifton 85 na região Sudeste do Brasil utilizando ferramentas geoestatísticas e multivariadas buscando descrever a variabilidade espacial da matéria orgânica do solo (MOS), além dos atributos químicos e físicos do solo e da cultura, verificar a necessidade de calagem e recomendar gestão localizada para esta prática agrícola, delineando dessa forma zonas de manejo. O estudo foi realizado na Fazenda Feno Rio, localizada na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica – RJ. Foram coletados 50 pontos em malha irregular e retirou-se amostras de terra deformadas nas profundidades de 0-0,20 e 0,20-0,40 m. Obteve-se os dados sobre a soma de bases trocáveis (SB), capacidade de troca de cátions total (Valor T), saturação por bases (V%), matéria orgânica (MO), argila total, areia total, silte, carbono na fração de ácido fúvico (C-FAF), fração de ácido húmico (C-FAH), fração de humina (C-HUM), carbono particulado (COp), carbono associado aos minerais (COam), matéria orgânica leve (MOL, teor de C e N), estimativa da massa fresca (MF) da Tifton 85 e a necessidade de calagem (NC) à taxa fixa e variável para a profundidade de 0-0,20 m. Os dados foram submetidos à avaliação da análise descritiva e exploratória e correlação linear de Pearson a 10% de significância ($p < 0,10$). Realizou-se análise geoestatística para a obtenção dos parâmetros variográficos e juntamente a krigagem ordinária foram confeccionados os mapas de variabilidade espacial para os atributos do solo. Os dados de MF foram transformados em indicadores de probabilidade, sendo possível representar espacialmente a probabilidade das regiões de maior e menor produtividades da cultura. Na geração das zonas de manejo, selecionou-se os atributos do solo que apresentaram correlação linear significativa com a MF. Estas variáveis foram submetidas à análise multivariada, análise de componentes principais e o método k-médias. Os resultados sugerem maiores teores de MOS (MO, C-FAF, C-FAH, C-HUM, COam e COp) nas regiões de alta probabilidade de ocorrência de maiores produtividades. O mapeamento da NC indicou que a aplicação de calcário em teores médios nas regiões homogêneas pode representar 23,3% a mais de aplicação que à taxa fixa. As variáveis selecionadas para o delineamento das zonas de manejo foram MF, argila total, areia total, MO, C-FAF e COam e a abordagem geoestatística com análise multivariada possibilitou a geração de duas zonas de manejo. Observou-se que na zona de manejo 1 (ZM1) foram verificadas as regiões de menor produtividade, com maior taxa de decomposição da MOS, maior necessidade de MO com certo grau de estabilidade no solo e que forneça nutrientes para o solo. Enquanto na zona de manejo 2 (ZM2) foram observadas as regiões com maiores probabilidades de apresentarem alta produtividade, maiores teores de matéria orgânica humificada, exibindo maior estabilidade, além de maiores teores de frações orgânicas lábeis. O manejo localizado com aplicação de adubação orgânica foi indicado, com maior aplicação na ZM1 e menores doses na ZM2, podendo contribuir para maiores produtividades, economia e manutenção das frações orgânicas destes solos de pastagem.

Palavras-chave: análise multivariada, Tifton 85, variabilidade espacial.

ABSTRACT

SILVA, Eudocio Rafael Otavio da. **Definition of pasture management zones based on soil attributes and use of geostatistics**. 2021. 92p. Dissertation (Master Science in Agricultural and Environmental Engineering). Institute of Technology, Engineering Department, Rural Federal University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2021.

The present study aimed to indicate managements located in a pasture area cultivated with Tifton 85 in the Southeast region of Brazil using geostatistical and multivariate tools seeking to describe the spatial variability of soil organic matter (SOM), in addition to the chemical and physical attributes of the soil and of the crop, check the need for liming and recommend localized management for this agricultural practice, thus delineating management areas. The study was carried out at Fazenda Feno Rio, located at the Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica – RJ. 50 points were collected in irregular mesh and deformed soil samples were taken at depths of 0-0.20 and 0.20-0.40 m. Data on the sum of exchangeable bases (SB), total cation exchange capacity (T value), base saturation (V%), organic matter (OM), total clay, total sand, silt, carbon in the fuvic acid fraction (C-FAF), humic acid fraction (C-FAH), humine fraction (C-HUM), particulate organic carbon (POC), mineral-associated organic carbon (MAOC), light organic matter (MOL, content of C and N), estimation of fresh mass (FM) of Tifton 85 and the need for liming (NL) at a fixed and variable rate for the depth of 0-0.20 m. The data were submitted to the evaluation of the descriptive and exploratory analysis and Pearson's linear correlation at 10% significance ($p < 0.10$). Geostatistical analysis was performed to obtain the variographic parameters and, together with the ordinary kriging, maps of spatial variability for soil attributes were made. The FM data were transformed into probability indicators, making it possible to spatially represent the probability of the regions with the highest and lowest productivity of the culture. In the generation of management zones, soil attributes were selected, which showed significant linear correlation with FM. These variables were subjected to multivariate analysis, principal component analysis and the k-means method. The results suggest higher levels of SOM (MO, C-FAF, C-FAH, C-HUM, MAOC and POC) in regions with a high probability of higher productivity. The NL mapping indicated that the application of lime at medium levels in the homogeneous regions may represent 23.3% more than the application at the fixed rate. The variables selected for the design of the management zones were FM, total clay, total sand, OM, C-FAF and MAOC and the geostatistical approach with multivariate analysis enabled the generation of two management zones. It was observed that in the management zone 1 (MZ1) the regions with the lowest productivity were verified, with the highest decomposition rate of the SOM, the greatest need for OM with a certain degree of stability in the soil and that provides nutrients for the soil. While in management zone 2 (MZ2), the regions with the highest probability of presenting high productivity, higher levels of humidified organic matter, showing greater stability, in addition to higher levels of labile organic fractions were observed. Localized management with the application of organic fertilizer was indicated, with greater application in MZ1 and lower doses in MZ2, which may contribute to greater productivity, economy and maintenance of the organic fractions of these pasture soils.

Key words: multivariate analysis, Tifton 85, spatial variability.

1 INTRODUÇÃO

No atual contexto da agricultura discussões sobre a conservação dos solos em áreas de pastagens devem ser levantadas nos setores da pecuária e aos agricultores produtores de forrageiras. Estima-se que 33% dos solos do mundo encontram-se em processo de degradação (FAO, 2015), com cerca de 130 milhões de hectares de pastagens degradadas apenas no Brasil (EMBRAPA, 2020). Em virtude disto, torna-se cada vez mais necessária a exigência de sustentabilidade destes setores de produção em possuírem agrossistemas mais eficientes e que considerem tanto os aspectos econômicos e agrônômicos, quanto os ambientais.

Grande parte dos solos das regiões tropicais e subtropicais apresenta baixa fertilidade natural devido à gênese do solo e ao intenso intemperismo, em função de altas temperaturas e precipitações pluviais (MELO & ALLEONI, 2019). Aliado a esses fatores, as ações antrópicas, provocadas pelo manejo inadequado do solo, corroboram para o esgotamento dos nutrientes do solo e acentuam os processos erosivos.

Os solos da região Sudeste do Brasil, especificamente os Latossolos e Argissolos Vermelho-Amarelos do Estado do Rio de Janeiro, são ocupados por grandes extensões de pastagem em algum grau de degradação devido a intensa exploração destes solos nessas áreas, decorrentes dos ciclos de café e cana-de-açúcar nos séculos XVIII e XIX (FREIRE et al., 2013; DEVIDE et al., 2014). Evidenciando que no presente cenário da agricultura existe a necessidade de uma perspectiva de práticas agrícolas sustentáveis.

O uso sustentável do solo em áreas de pastagens reduz o risco de erosão, sendo reconhecida a importância das pastagens na proteção do meio ambiente, na conservação da biodiversidade e dos recursos naturais, no sequestro de carbono, na reciclagem de nutrientes e no combate à desertificação (SERRANO et al., 2016). Além disto, as áreas de pastagens brasileiras possuem potencial para o aumento da produtividade da pecuária desde que seja feita a recuperação destas áreas (DIAS-FILHO, 2014).

Em sistemas agropecuários com áreas bem manejadas, o uso da Tifton 85 pode ser recomendado (NOGUEIRA et al., 2013; COUTINHO et al., 2014). Esta forrageira tem despertado interesse dos produtores por sua versatilidade em uso e por possuir rizomas que lhe conferem resistência ao frio e a seca, alta digestibilidade pelos animais, elevado potencial de produção de forragem e concentração de proteína bruta, entre outros fatores (SILVA et al., 2017a; ARAÚJO et al., 2018), sendo, entretanto, muito rigorosa quanto à fertilidade do solo. O esgotamento de alguns nutrientes no solo que podem ser causados pela cultura mostra a importância de adequado manejo, uma vez que a má gestão desse sistema ocasiona a degradação dos mesmos.

A matéria orgânica do solo (MOS) é um dos principais indicadores de qualidade do solo e condiciona uma maior produtividade agrícola. As inadequadas atividades agrícolas como a queima e remoção de resíduos das culturas, pastoreio excessivo, preparo inadequado do solo, juntamente com as condições ambientais, são fatores que diminuem a matéria orgânica do solo (MOS) sendo estes os principais problemas de preservação destes solos (JUG et al., 2018; ĐURĐEVIĆ et al., 2019). Em decorrência desse aspecto, práticas agrícolas envolvendo a agricultura de precisão (AP) apresentam-se como um possível meio de manejar estas áreas e de contornar essa problemática. A investigação da variabilidade espacial dos atributos do solo e da cultura e o gerenciamento agrícola de forma localizada das áreas de cultivo possibilita o entendimento das relações de causa e efeito ocasionadas devido à heterogeneidade dos solos (OHANA-LEVI et al., 2020). Com base na variabilidade espacial dos atributos, é possível identificar unidades homogêneas no campo e indicar manejos localizados específicos, determinando-se zonas de manejo.

Essa identificação permite ao agricultor a tomadas de decisões de forma mais acurada, melhorando a distribuição dos insumos agrícolas, aplicações de manejos de forma

personalizada nas regiões de potencial produtivo e maior controle sobre a distribuição espacial do conteúdo de MOS. Além da possibilidade de melhor compreensão da dinâmica do carbono do solo a partir do estudo das frações da MOS e de suas relações com outras variáveis, estimulando práticas que aumentem os teores de MO do solo.

Abordagens utilizando AP tem apresentado resultados promissores quando são empregadas ferramentas de geoestatística para a elaboração de mapas de variabilidade espacial de atributos químicos, físicos e de frações da MOS (MARCHETTI et al., 2012; SILVA et al., 2017b; ĐURĐEVIĆ et al., 2019), investigando-se a variabilidade de áreas de pastagens a partir de sensores ópticos (DONALD et al., 2013; SIMÕES et al., 2015; SERRANO et al., 2016), na recomendação de aplicação de insumos agrícolas à taxa variável (GONTIJO et al., 2016; BERNARDI et al., 2016; MATIAS et al., 2019) e na análise multivariada para a definição de zonas de manejo em produções agrícolas (JACINTHO et al., 2017; MOHARANA et al., 2020; OHANA-LEVI et al., 2020).

Além dos aspectos ambientais relacionados à qualidade do solo e justificando economicamente a utilização das tecnologias de AP em áreas com pastagens, é importante entender-se que os parâmetros qualitativos da Tifton 85 e de sua fenação estão altamente relacionados ao manejo e às etapas envolvidas no plantio, colheita, secagem e armazenamento, assim como condições climáticas favoráveis e às características do solo. Logo, o planejamento das etapas de cultivo e o adequado manejo localizado do solo podem resultar em ganhos positivos aos agricultores e pecuaristas. Visto que a qualidade da gramínea é respondida de maneira indireta nos animais que consomem o produto, como o ganho de peso (MOREIRA et al., 2014).

A partir do exposto, o presente estudo teve como objetivo indicar manejos localizados em área de pastagem cultivada com Tifton 85 na região Sudeste do Brasil utilizando ferramentas geoestatísticas e multivariadas buscando i) descrever a variabilidade espacial da MOS, além de atributos químicos e físicos do solo e da cultura, ii) verificar a necessidade de calagem e recomendar gestão localizada para esta prática agrícola, e iii) delinear zonas de manejo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de Estudo

O estudo foi realizado na Fazenda Feno Rio (22° 47' 27.68" S e 43° 40' 49.24" W), localizada na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), município de Seropédica, Rio de Janeiro, região sudeste do Brasil. Nesta região, o clima é classificado como Aw, com precipitações pluviométricas médias de 1.213 mm no ano e temperatura média do ar de 23,9 °C.

A fazenda possui um sistema de cultivo de gramínea Tifton 85 (*Cynodon* spp.) para a produção de feno com ciclos da cultura ao longo do ano, em que há a correção da acidez dos solos desta região a partir da aplicação convencional de calagem em taxa fixa. A área de condução do experimento foi de 3,91 ha, altitude média de 26 m, com relevo plano e solo classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico típico (SANTOS et al., 2018).

Foram realizadas coletas de 50 pontos em malha irregular e amostragem aleatória, georreferenciadas utilizando-se Estação Total Leica, Série TPS300 Basic. Utilizando-se o trado holandês, em cada ponto de amostragem foram retiradas amostras de terra deformadas nas profundidades de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m (Figura 1), totalizando 100 amostras.

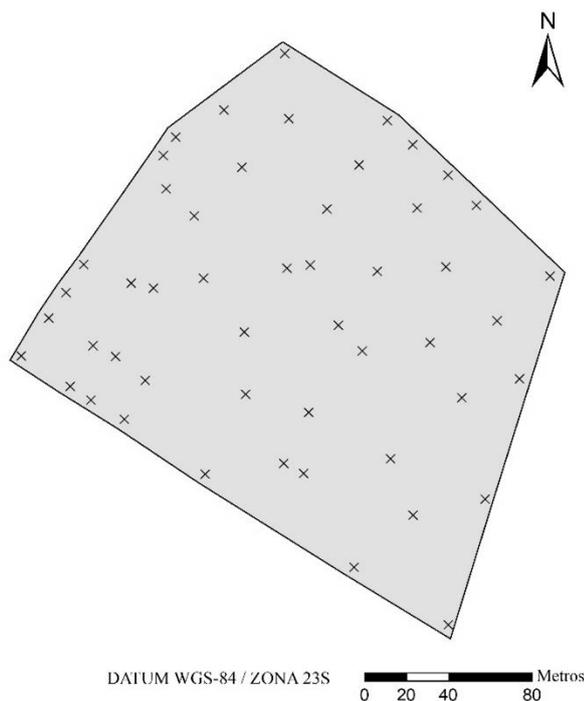


Figura 1. Área experimental e distribuição espacial dos pontos georreferenciados na área de cultivo da Tifton 85.

2.2. Análise dos Atributos e Construção do Banco de Dados

Após a coleta, as amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas por peneira de 2.00 mm de malha para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). Foram obtidos para as duas profundidades os dados sobre pH, utilizando-se a relação 1:2,5 de solo em água, Ca, Mg, Al, Na, K trocáveis, P assimilável, acidez potencial (H + Al) e carbono orgânico total (COT), os resultados encontram-se disponíveis em Silva et al. (2020). A partir dos teores de nutrientes no solo foram obtidos os dados sobre a soma de bases trocáveis (SB), capacidade de troca de cátions total (Valor T), saturação por bases (V%) e matéria orgânica (MO), além dos teores de argila total, areia total, silte, teor de carbono na fração de ácido fúvico (C-FAF), fração de ácido

húmico (C-FAH), fração de humina (C-HUM), carbono particulado (CO_p), carbono associado aos minerais (CO_{am}), matéria orgânica leve (MOL, teor de C e N), além da estimativa da massa fresca da Tifton 85 e a necessidade de calagem (NC) à taxa fixa e variável para a profundidade de 0-0,20 m.

Os valores de SB, Valor T e V% foram calculados segundo Teixeira et al. (2017). A frações granulométricas de areia total, argila total e silte foram obtidas conforme modificação proposta por Rezende (1979) e pelo método da pipeta (DAY, 1965). Utilizou-se o pacote “soiltexture” do software R 3.5.1 para a geração do triângulo textural, indicando as classes texturais das amostras em cada ponto amostrado (MOEYS, 2018).

A MO foi obtida a partir da estimativa do carbono orgânico total (COT) segundo Yeomans e Bremner (1988). As frações húmicas do solo C-FAF, C-FAH, C-HUM foram obtidas pelo fracionamento químico da MOS segundo a técnica de solubilidade diferencial (SWIFT, 1996) e adaptados por Benites et al. (2003). Para a obtenção do CO_p realizou-se o fracionamento granulométrico da MOS conforme Cambardella e Elliott (1992) e oxidação via úmida segundo Yeomans e Bremner (1988). O CO_{am} foi obtido a partir da diferença entre COT e CO_p.

A quantificação da MOL foi avaliada pelo método da flotação (ANDERSON & INGRAM, 1989). Posteriormente, foram determinados os valores de C e N contidos na massa de MOL, pelo método de combustão a seco em um auto analisador de C e N a 900°C (CHN-600 Carlo Erba EA-1110, Itália).

Para a obtenção da massa fresca (MF) utilizou-se um gabarito metálico retangular de 0,35 m² em torno dos pontos amostrais, onde foram realizados o corte da gramínea na área delimitada e pesados seus valores para serem utilizadas na avaliação das regiões mais e menos produtivas.

Visando a gestão localizada de aplicação de corretivos agrícolas, foi calculada a necessidade de calagem (NC) em taxa fixa e variável e, em seguida, os métodos foram comparados. O cálculo da NC foi realizado segundo o método de saturação por bases (Equação 1).

$$NC = \frac{(V_2 - V_1) \times CTC}{PRNT} \times 1000 \quad (1)$$

Em que NC: necessidade de calagem (kg ha⁻¹); V₂: saturação por bases desejada após a correção (%); V₁: saturação por bases inicial (%); CTC: capacidade de troca catiônica (cmol_c kg⁻¹); PRNT: poder relativo de neutralização (%).

O PRNT utilizado na execução deste estudo foi de 80% seguindo as informações obtidas do calcário aplicado comumente na região. Adotou-se como 60% o valor de V% desejado, em vista de Coutinho et al. (2014) mencionarem ser este o valor necessário para a manutenção de gramíneas do gênero *Cynodon*. Na recomendação de calagem a taxa fixa realizou-se a formação de amostragem composta a partir de amostras simples coletadas de forma aleatória na área experimental na profundidade de 0-0,20 m. A análise desta amostra composta representou a média dos atributos avaliados, sendo utilizadas na obtenção da recomendação em taxa fixa. Para a geração do mapa de necessidade de calagem em taxa variável utilizou-se os valores de V% e CTC espacializados e a conversão dos mesmos para as recomendações de calagem (MOLIN et al., 2015).

2.3. Estatística Descritiva e Geoestatística

Para a avaliação da análise descritiva e exploratória dos dados utilizou-se software R 3.5.1 e o software PAST 3.5. Foram obtidos de cada atributo os valores mínimos, médios,

máximos, coeficiente de variação (CV), desvio padrão, assimetria e curtose, assim como identificados valores discrepantes (outliers) de cada parâmetro em estudo.

Os valores de CV foram classificados segundo Warrick e Nielsen (1980) e foi testada a hipótese de normalidade dos dados a partir do teste de Shapiro-Wilk (Teste W) a 5% de significância ($p < 0,05$). A fim de verificar as correlações entre as variáveis em estudo, realizou-se a correlação linear de Pearson a 10% de significância ($p < 0,10$).

Os dados foram submetidos à análise geoestatística para a obtenção dos parâmetros variográficos, com utilização do software R 3.5.1. Os semivariogramas foram calculados de acordo com a Equação 2.

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

Em que $\hat{\gamma}(h)$: semivariância de um atributo; $N(h)$: número de pares de valores medidos $Z(x_i)$ e $Z(x_i+h)$, separados por um vetor distância h (m).

O ajuste dos modelos de semivariogramas foi determinado em função dos métodos dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) e Máxima Verossimilhança (MV), onde foram testados para ambos os métodos os modelos esférico, exponencial e gaussiano.

A validação cruzada dos dados foi considerada na escolha do método e do modelo de ajuste do semivariograma, em que foram estimados o erro médio reduzido (\overline{ER}) (Equação 3) e o desvio padrão do erro médio reduzido (S_{ER}) (Equação 4) (MELLO et al., 2005). No método da Máxima Verossimilhança o valor do Critério de Informação de Akaike (AIC) também foi considerado na escolha do modelo ajustado.

$$\overline{ER} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{Z(x_{i0}) - \hat{Z}(x_{i0})}{\sigma(x_{i0})} \quad (3)$$

$$S_{ER} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{Z(x_{i0}) - \hat{Z}(x_{i0})}{\sigma(x_{i0})}} \quad (4)$$

Em que $Z(x_{i0})$: valor observado no ponto $i0$; $\hat{Z}(x_i)$: valor estimado no ponto $i0$; $\sigma(x_{i0})$: desvio padrão da krigagem no ponto $i0$;

Foi realizada a krigagem ordinária e obtidos os mapas de variabilidade espacial das variáveis que apresentaram os parâmetros variográficos (efeito pepita, patamar e alcance) que respeitassem às pressuposições de Cambardella et al. (1994): grau de dependência espacial forte (GDE < 25% da relação entre efeito pepita e patamar), dependência espacial moderada (GDE entre 25 e 75%) e dependência espacial fraca (GDE > 75%).

Os parâmetros do semivariograma obtidos da massa fresca (MF) foram utilizados na geração do mapa de probabilidade. Este mapa foi calculado a partir dos pesos obtidos por meio da krigagem ordinária (VIEIRA et al., 1983; JOURNAL & RAO, 1996; YAMAMOTO, 2010) e indicaram as regiões de maior e menor probabilidade de serem produtivas.

Desta forma, os dados de MF foram transformados em indicadores de probabilidade, no qual se a variável em estudo apresentasse valores acima de determinado valor de corte preestabelecido, haveria maior probabilidade de ocorrência em determinado ponto (direção a 100% de probabilidade); caso apresentassem valores abaixo do valor de corte, menor probabilidade de ocorrência (direção a 0% de probabilidade).

A definição do ponto de corte foi realizada em função do valor médio de MF de toda a área. Logo, foi adotado para a variável MF o valor de corte igual a 4.505,8 kg ha⁻¹, sendo

possível representar a probabilidade das regiões de maior e menor produtividades de cultivo da Tifton 85.

Realizou-se a cokrigagem ordinária (CK) nas variáveis que não apresentaram boas estimativas espaciais. Desta forma, a estimativa de uma variável primária foi melhor determinada utilizando-se uma variável secundária de maior continuidade espacial (Equações 5 e 6) (ISAACS & SRIVASTAVA, 1989; YAMAMOTO & LANDIM, 2013). O conjunto de dados utilizados eram isotópicos (pontos de amostragem coincidentes) e foi verificada correlação significativa entre os atributos. Os modelos foram ajustados segundo o método dos Mínimos Quadrados Ordinários e foi realizada a validação cruzada dos dados.

$$\hat{y}_{12}(h) = \frac{1}{2N(h)} \left\{ \sum_{i=1}^{N(h)} [Z_1(x_i + h) - Z_1(x_i)] * [Z_2(x_i + h) - Z_2(x_i)] \right\} \quad (5)$$

$$Z_2^*(X_0) = \sum_{i=1}^{N_1} \lambda_{1i} Z_1(X_{1i}) + \sum_{j=1}^{N_2} \lambda_{2j} Z_2(X_{2j}) \quad (6)$$

Em que \hat{y}_{12} : semivariograma cruzado entre duas variáveis Z_1 e Z_2 ; Z_2^* : valor estimado para qualquer local, X_0 , a partir da combinação linear de Z_1 e Z_2 ; λ_1 e λ_2 : pesos distribuídos de acordo com a dependência espacial de cada uma das variáveis entre si e com a correlação cruzada entre elas.

Para a geração dos mapas de variabilidade espaciais utilizou-se o *software* ArcGis 10.5.2 (ESRI, 2016).

2.4 Análise Multivariada e Geração das Zonas de Manejos (ZM)

O delineamento das zonas de manejo foi realizado a partir dos atributos do solo na camada de 0-0,20 m, em vista da maior presença de raízes da Tifton 85 e do maior teor de carbono nessa camada do solo (SILVA et al., 2020). Os atributos do solo que apresentaram correlação linear significativa com a massa fresca (MF) foram os selecionados para a geração das zonas de manejo (MOLIN et al., 2015; JACINTHO et al., 2017). Estas variáveis foram submetidas à análise multivariada. Para isto, os dados das variáveis selecionadas foram normalizados por meio da relação entre a média e o desvio padrão retirando-se os efeitos das diferentes unidades de medida.

Foi aplicada a análise de componentes principais (PCA) a partir da matriz de covariância, obtendo-se a contribuição de cada componente, os scores e os pesos das variáveis. Entre os componentes de maior contribuição, foi verificada as variáveis de maiores pesos (coeficientes) e que influenciaram no delineamento das ZM (OHANA-LEVI et al., 2020).

Em seguida, estas variáveis foram submetidas à análise de agrupamento não hierárquico (análise de cluster). Para isto, foi utilizado o método de particionamento não supervisionado k-médias, no qual os elementos foram classificados naturalmente e pertencentes distintamente a um único grupo, em que foram testados diferentes números k de classes. O número de zonas de manejo foi o número de agrupamentos formados (OHANA-LEVI et al., 2020). Foi avaliada a heterogeneidade dos resultados entre as zonas de manejo a partir do teste de comparação de médias de Tukey a 5% de significância ($p < 0,05$).

Para a realização das análises multivariadas foi utilizado o software PAST 3.5. Os mapas de zonas de manejo foram produzidos por meio do software ArcGis 10.5 A Figura 2 exhibe as etapas desenvolvidas neste trabalho.

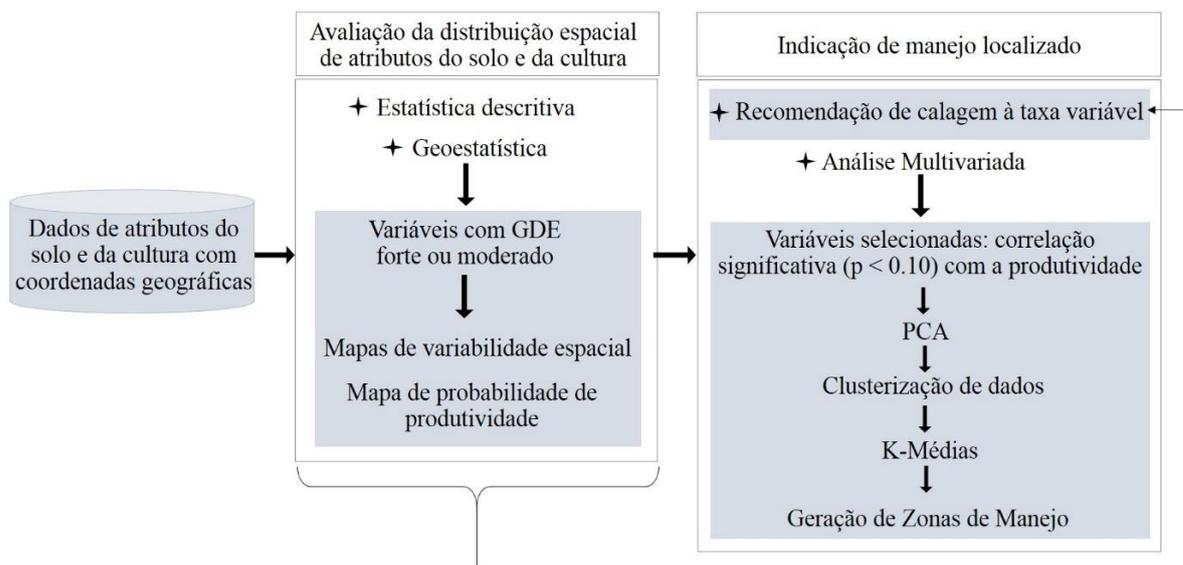


Figura 2. Etapas desenvolvidas para a indicação de gestão localizada em cultivo de Tifton 85 a partir da variabilidade espacial e geração de zonas de manejo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Variabilidade Espacial dos Atributos do Solo e da Cultura

A análise exploratória e descritiva dos dados exibidos na Tabela 1 permite a visualização de informações dos atributos em estudo e enfatizam suas amplitudes, variações e distribuições.

Tabela 1. Estatística descritiva dos atributos do solo e da cultura

Variável	Min	Max	Média	DP	CV%	Ass	Curt	W
0-0,20 m								
SB (cmol _c kg ⁻¹)	2,77	4,84	3,67	0,53	14,47	0,24	-0,83	0,971 ^{ns}
Valor T (cmol _c kg ⁻¹)	4,90	14,74	8,84	2,19	24,74	0,53	-0,19	0,967 ^{ns}
V%	20,15	76,33	44,76	14,69	32,81	0,27	-1,00	0,967 ^{ns}
Argila total (g kg ⁻¹)	111,36	497,46	276,48	109,80	39,71	0,32	-1,03	0,938*
Areia total (g kg ⁻¹)	254,69	695,25	481,13	119,67	24,87	-0,23	-0,87	0,955 ^{ns}
Silte (g kg ⁻¹)	169,31	330,05	242,39	37,93	15,65	0,42	-0,31	0,968 ^{ns}
MO (g kg ⁻¹)	13,69	49,25	32,28	7,23	22,40	-0,24	0,81	0,970 ^{ns}
C-CAF (g kg ⁻¹)	1,24	3,74	2,21	0,58	26,04	0,17	-0,36	0,977 ^{ns}
C-CAH (g kg ⁻¹)	0,27	4,18	2,42	1,05	43,33	-0,16	-0,92	0,971 ^{ns}
C-HUM (g kg ⁻¹)	4,35	14,75	9,23	2,73	29,63	0,03	-0,87	0,970 ^{ns}
COp (g kg ⁻¹)	0,97	9,50	3,52	1,53	43,60	1,49	3,92	0,899*
COam (g kg ⁻¹)	5,98	24,24	15,25	3,60	23,64	-0,49	0,93	0,962 ^{ns}
N-MOL (g kg ⁻¹)	8,30	17,90	11,90	0,21	18,01	0,86	0,83	0,944*
C-MOL (g kg ⁻¹)	203,00	406,00	305,40	3,97	13,00	-0,30	1,04	0,962 ^{ns}
MF (kg ha ⁻¹)	686,00	12675,05	4505,85	2909,38	64,57	1,21	1,27	0,894*
NC (kg ha ⁻¹)	0,00	7343	1685	1944,7	91,35	0,66	-0,56	0,899*
0,20-0,40 m								
SB (cmol _c kg ⁻¹)	1,29	4,79	2,75	0,74	26,80	0,50	-0,07	0,971 ^{ns}
Valor T (cmol _c kg ⁻¹)	3,26	12,20	7,19	2,43	33,85	0,32	-1,02	0,953 ^{ns}
V%	17,72	81,48	43,50	19,80	45,51	0,39	-1,13	0,905*
Argila total (g kg ⁻¹)	135,44	578,63	337,70	130,81	38,74	0,43	-1,02	0,920*
Areia total (g kg ⁻¹)	234,45	695,25	456,46	133,41	29,23	-0,21	-1,00	0,935*
Silte (g kg ⁻¹)	150,24	290,00	205,84	38,06	18,49	0,50	-0,47	0,953 ^{ns}
MO (g kg ⁻¹)	4,09	37,17	24,17	7,03	29,09	-0,61	0,87	0,953 ^{ns}
C-CAF (g kg ⁻¹)	0,34	2,48	1,44	0,48	33,68	0,06	-0,47	0,989 ^{ns}
C-CAH (g kg ⁻¹)	0,29	3,35	1,55	0,86	55,78	0,40	-1,03	0,938 ^{ns}
C-HUM (g kg ⁻¹)	2,35	12,89	7,25	2,48	34,24	-0,09	-0,45	0,984 ^{ns}
COp (g kg ⁻¹)	0,23	2,98	1,19	0,69	58,24	0,75	-0,02	0,937 ^{ns}
COam (g kg ⁻¹)	1,57	20,16	12,86	3,88	30,19	-0,68	1,05	0,947*
N-MOL (g kg ⁻¹)	4,80	21,90	11,30	0,43	38,90	1,05	0,35	0,892*
C-MOL (g kg ⁻¹)	168,00	833,00	323,10	12,53	38,78	2,06	5,81	0,821*

Min: Mínimo; Max: Máximo; DP: Desvio padrão; CV%: Coeficiente de variação; Ass: Assimetria; Curt: Curtose; W: Teste de normalidade de Shapiro-Wilk, *significativo a 5% ($p < 0,05$); ns: não significativo no teste de normalidade de Shapiro-Wilk a 5%.

A normalidade dos dados foi verificada com o objetivo de se obter as melhores previsões possíveis dos espaços não amostrados quando realizada a krigagem ordinária. Observou-se que

alguns atributos nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m apresentaram normalidade dos dados pelo teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância ($p < 0,05$). Os atributos não significativos neste teste foram avaliados a partir dos valores de assimetria e curtose, em que foram observados valores próximos de zero indicando a tendência à normalidade dos dados.

Os valores de CV de todos os atributos do solo nas duas camadas em estudo apresentaram-se como médios ($12 < CV < 60\%$) de acordo com a classificação de Warrick e Nielsen (1980), exceto para os valores de MF e NC, os quais apresentaram alta variabilidade dos dados. Resultados similares foram observados em Silva et al. (2017b) em um trabalho no qual os autores avaliaram a variabilidade espacial das frações orgânicas do solo em um sistema agroflorestal localizado na Mata Atlântica, em Seropédica – RJ, sendo verificados valores médios de CV para todos os atributos, exceto o C-FAH na camada 0-0,10 m.

Os valores médios de C da matéria orgânica leve (C-MOL) sugerem maiores perdas das frações lábeis na camada superficial (0-0,20 m), o que pode ser decorrente da maior intensidade das práticas agrícolas nesta camada. A maior presença de C-MOL na camada 0,20-0,40 m pode ser explicada pela presença de resíduos vegetais na subsuperfície advindos da rizo-deposição e renovação do sistema radicular da Tifton 85.

Para a relação C/N da MOL foram observados valores médios iguais a 25,66 e 28,59 para as camadas 0-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente. Indicando maior qualidade dos resíduos da gramínea na camada subsuperficial e menor decomposição destes resíduos, com menor concentrações de N.

A MOL representa o material orgânico mais jovem, de origem recente e biologicamente mais ativo, externo aos agregados. Os seus teores estão relacionados ao tipo de solo, vegetação, clima e manejo adotado (MELO & ALLEONI, 2019) e seu substrato é usado como fonte de energia para crescimento microbiano e para a liberação de nutrientes através da ciclagem de biomassa. A partir desta perspectiva, notou-se que os valores de MOL da área em estudo indicaram uma oferta de substrato no mesmo nível a outros agrossistemas brasileiros.

Comparando os valores de C-MOL encontrados com os observados no estudo desenvolvido por Loss et al. (2012) verifica-se que na profundidade de 0,05-0,10 m foram 278,10, 307,25 e 324,60 g kg⁻¹ em sistema de integração lavoura - pecuária (ILP), sistema de plantio direto - SPD e cobertura vegetal de Cerrado natural no Estado do Goiás, respectivamente. Os autores também verificaram valores da relação C/N da MOL oscilando entre 17,32 (SPD), 19,76 (ILP) e 24,13 (Cerrado). Como apontados por Roscoe e Machado (2002), as pastagens cultivadas apresentam tendência a manter as quantidades de MOL, enquanto os teores podem ser mais elevados para solos sob vegetação nativa e menores para solos com culturas anuais.

Quanto ao aspecto geoestatístico, na Tabela 2 são apresentados os valores dos parâmetros obtidos no estudo dos semivariogramas de cada variável.

Tabela 2. Parâmetros dos modelos variográficos, validação cruzada e erros de previsão associados obtidos para os atributos (continua)

Variável	Método de ajuste	Modelo	Alcance (m)	GDE (%)	\overline{ER}	S_{ER}	AIC
0-0,20 m							
SB	EPP	-	-	-	-	-	-
Valor T	MV	Esf	32,8	Forte	-0,0014	1,0564	216,106
V%	MV	Esf	30,6	Forte	-0,0088	1,0614	399,689
Argila total	MQO	Exp	31,3	Forte	-0,0024	1,0364	-
Areia total	MQO	Exp	29,1	Forte	0,0065	1,0461	-
Silte	MV	Exp	10,2	Forte	0,0230	1,0759	490,929

Tabela 2. Continuação

MO	MQO	Esf	49,2	Forte	0,0028	1,2114	-
C-CAF	MQO	Gau	156,9	Moderado	0,0118	1,0491	-
C-CAH	MV	Esf	46,8	Moderado	0,0002	1,0442	146,191
C-HUM	MV	Gau	7,8	Forte	0,0083	1,0339	239,430
COp	MV	Esf	19,1	Forte	0,0182	1,0787	182,738
COam	MQO	Gau	21,5	Forte	-0,0134	1,1727	-
N-MOL	EPP	-	-	-	-	-	-
C-MOL	EPP	-	-	-	-	-	-
NC	MV	Gau	12,0	Forte	0,0049	1,0809	865,32
0,20-0,40 m							
SB	EPP	-	-	-	-	-	-
Valor T	MV	Gau	12,3	Forte	0,0089	1,0629	226,947
V%	EPP	-	-	-	-	-	-
Argila total	MQO-CK	Exp	30,0	Moderado	-	-	-
Areia total	MQO-CK	Exp	30,0	Moderado	-	-	-
Silte	MQO	Gau	22,4	Moderado	0,0084	1,1359	-
MO	MV	Gau	13,6	Forte	-0,0113	1,0737	329,298
C-CAF	MQO-CK	Esf	50,0	Moderado	-	-	-
C-CAH	MQO-CK	Gau	30,0	Moderado	-	-	-
C-HUM	MQO-CK	Esf	50,0	Forte	-	-	-
COp	MQO	Esf	21,4	Moderado	0,0052	1,0677	-
COam	MV	Gau	14,8	Forte	-0,0142	1,0761	271,964
N-MOL	EPP	-	-	-	-	-	-
C-MOL	EPP	-	-	-	-	-	-
MF	MQO	Exp	23,3	Forte	-0,0008	1,1340	-

Modelo: Esf – esférico, Exp – exponencial, Gau – gaussiano; GDE: Grau de dependência espacial; \overline{ER} : Erro médio reduzido; S_{ER} : Desvio padrão do erro médio reduzido; AIC: Critério de informação de Akaike; EPP: Efeito pepita puro; MV: Máxima Verossimilhança; MQO: Mínimos quadrados Ordinários; MQO-CK: Cokrigagem ordinária com modelo ajustado pelo método dos Mínimos Quadrados Ordinários. Variáveis utilizadas no semivariograma cruzado: argila total da camada 0,20-0,40 m (variável primária) e argila total da camada 0-0,20 m (variável secundária), areia total da camada 0,20-0,40 m (v. primária) e areia total da camada 0-0,20 m (v. secundária), C-FAF (v. primária) e MO (v. secundária) da camada de 0,20-0,40 m, C-FAH (v. primária) e MO (v. secundária) da camada de 0,20-0,40 m, C-HUM (v. primária) e COam (v. secundária) da camada de 0,20-0,40 m.

Dentre as variáveis da camada de 0-0,20 m para as quais observou-se dependência espacial, apenas o C-FAF e C-FAH apresentaram grau de dependência espacial (GDE) moderado, enquanto os demais atributos indicaram forte dependência espacial segundo a classificação de Cambardella et al. (1994). Na camada de 0,20-0,40 m, excetuando as variáveis que apresentaram efeito pepita puro (EPP), apenas o Valor T, MO, C-HUM e COam indicaram forte dependência espacial, enquanto para as demais variáveis verificou-se GDE moderado. A moderada dependência espacial determinada por grande parte dos atributos da camada de 0,20-0,40 m pode estar relacionada ao aumento dos valores de CV em profundidade, sugerindo maior heterogeneidade nesta camada devido aos manejos do solo advindo de operações agrícolas como o preparo do solo, como indicados por Cambardella et al. (1994).

O modelo esférico foi o mais frequente dentre os modelos de ajustes, seguido do modelo gaussiano e exponencial. Os maiores ajustes dos semivariogramas para os modelos esféricos em atributos da matéria orgânica do solo (MOS) foram observados por Leite et al. (2015) e

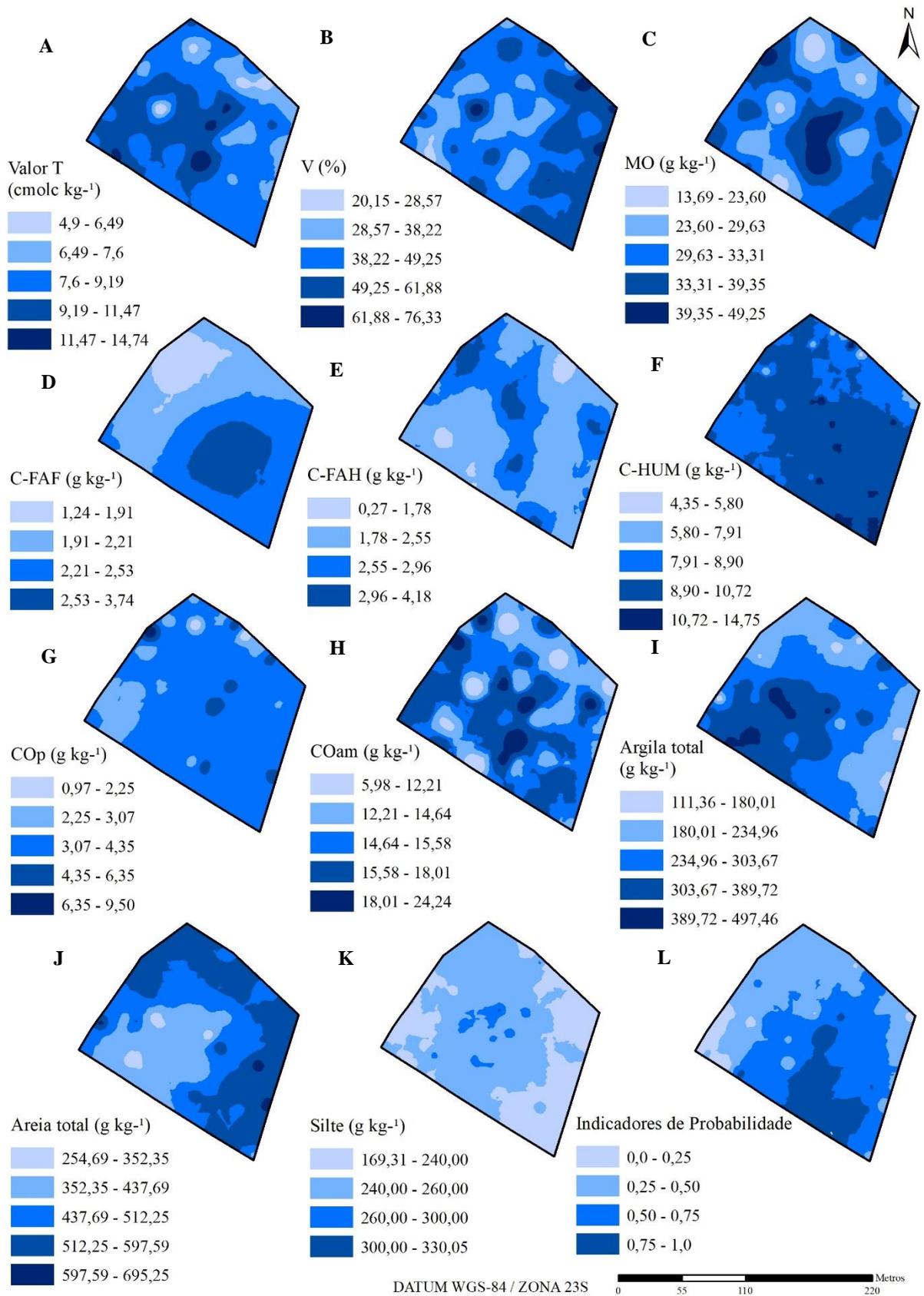


Figura 4. Mapas de variabilidade espacial gerados a partir de krigagem ordinária das variáveis na camada de 0-0,20 m na área de cultivo de Tifton 85.

Os solos da região em estudo encontram-se inseridos no domínio morfoclimático conhecido como “Mares de Morros”, e são originados por rochas de caráter ácido, sobretudo, gnaisse e granito, ou pelos sedimentos produzidos a partir do intemperismo destas rochas (FREIRE et al., 2013). Analisando o relevo local, observou-se que a área experimental se situa em um ponto baixo da paisagem, consistindo em um solo alóctone, formado por sedimentos advindos de pontos mais altos.

A intemperização das rochas e a deposição dos sedimentos nestas áreas de baixada formaram solos comumente ácidos, com valores de saturação por bases naturalmente abaixo de 50% e de baixa fertilidade natural (FREIRE et al., 2013), como pode ser observado em grande parte da área de Tifton 85 que apresentou baixos e altos Valores T (Figura 4A), porém com baixos valores médios de SB, com predomínio da acidez potencial. Os menores valores de V% foram identificados nas faixas da região central, norte e oeste (Figura 4B). Este padrão sugere a necessidade de correção da acidez destes solos com o emprego de insumos agrícolas para torná-los potencialmente mais produtivos e adequados ao cultivo da gramínea do gênero *Cynodon*.

Na Figura 4D na região norte observou-se os menores teores de C-FAF indicando que as frações lábeis foram mais facilmente removidas do solo nesta região, desfavorecendo o equilíbrio dinâmico e propiciando a redução dessa fração e modificação da relação na distribuição das substâncias húmicas. Os maiores teores de C-FAH (Figura 4E) foram verificados na região central, nordeste e leste e a fração C-HUM (Figura 4F) na região central e sul da área de Tifton 85. Esse padrão permite inferir que estas são as regiões de maiores frações estáveis da MOS, sendo favorecidas pelo relevo no acúmulo destas frações, em função de pior drenagem e decomposição mais lenta nestas regiões. Estas características, juntamente as maiores taxas de C-FAF nas mesmas regiões, fornecem solos em boas condições de cultivo, demonstrados, inclusive, com as maiores probabilidades de serem mais produtivos.

A distribuição espacial de MO, C-FAF, C-FAH, C-HUM, COam e COp (Figuras 4C-H) sugerem que os maiores teores de MOS estão distribuídos nas regiões de alta probabilidade de ocorrência de maiores produtividades. Esse padrão é confirmado ao observar a correlação positiva e significativa a 10% da MF com os atributos MO, C-FAF e COam.

Verificou-se que os teores das frações da MOS na camada de 0-0,20 m apresentaram valores próximos dos observados em Silva et al. (2017b), no qual foram espacializadas as frações da MOS (C-FAF, C-FAH, C-HUM, COam e COp) sob sistema agroflorestal em camada superficial do solo (0-0,10 m), sendo as áreas experimentais de ambos os estudos estão sob as mesmas condições climáticas.

As regiões de maiores teores de COam estão relacionadas as maiores probabilidades de alta produtividade (maiores quantidades de resíduos vegetais) e aos maiores teores de C-FAH, vistos na correlação significativa na Figura 3A e espacialização destes atributos na Figura 4H. Foram observados maiores teores de COam em comparação a COp, isto ocorre devido ao COam possuir um ciclo mais lento de decomposição, sendo mais recalcitrante no ambiente, e possuir maior interação com a fração mineral do solo. De forma geral, a matéria orgânica associada que apresenta dimensões da areia possui uma dinâmica mais rápida que as frações silte e argila (ROSCOE & MACHADO, 2002).

Na Figura 4L é apresentada a distribuição da incerteza probabilística de ocorrência da variável MF, indicando as regiões de menor e maior produtividade. As probabilidades de ocorrência de encontrar valores maiores que o valor de referência estabelecido para a produtividade ($> 4505,8 \text{ kg ha}^{-1}$) são nas regiões central, sul e sudoeste do mapa, apresentando probabilidades de ocorrência de 50 a 100%.

Pode-se observar que as probabilidades de ocorrências de maiores produtividades estão localizadas, sobretudo, nas áreas de textura média. Esse padrão sugere que as frações granulométricas nestas regiões se apresentam em teores suficientes para promover retenção de

umidade adequada na camada superficial do solo. Como indicado por Pinheiro et al. (2018), o mapeamento e a estimacão dos valores de textura do solo na AP são importantes, pois a textura do solo está diretamente relacionada com a produtividade.

As menores probabilidades de ocorrências de alta produtividade são, sobretudo, na região oeste do mapa, apresentando valores de 0 a 25% de probabilidade de ocorrência de alta produtividade. Estes valores podem estar relacionados aos altos teores de Valor T e baixos valores de V% nesta região, indicando regiões de maior acidez potencial.

Na Figura 5  apresenta a distribuico espacial dos atributos do solo na camada de 0,20-0,40 m.

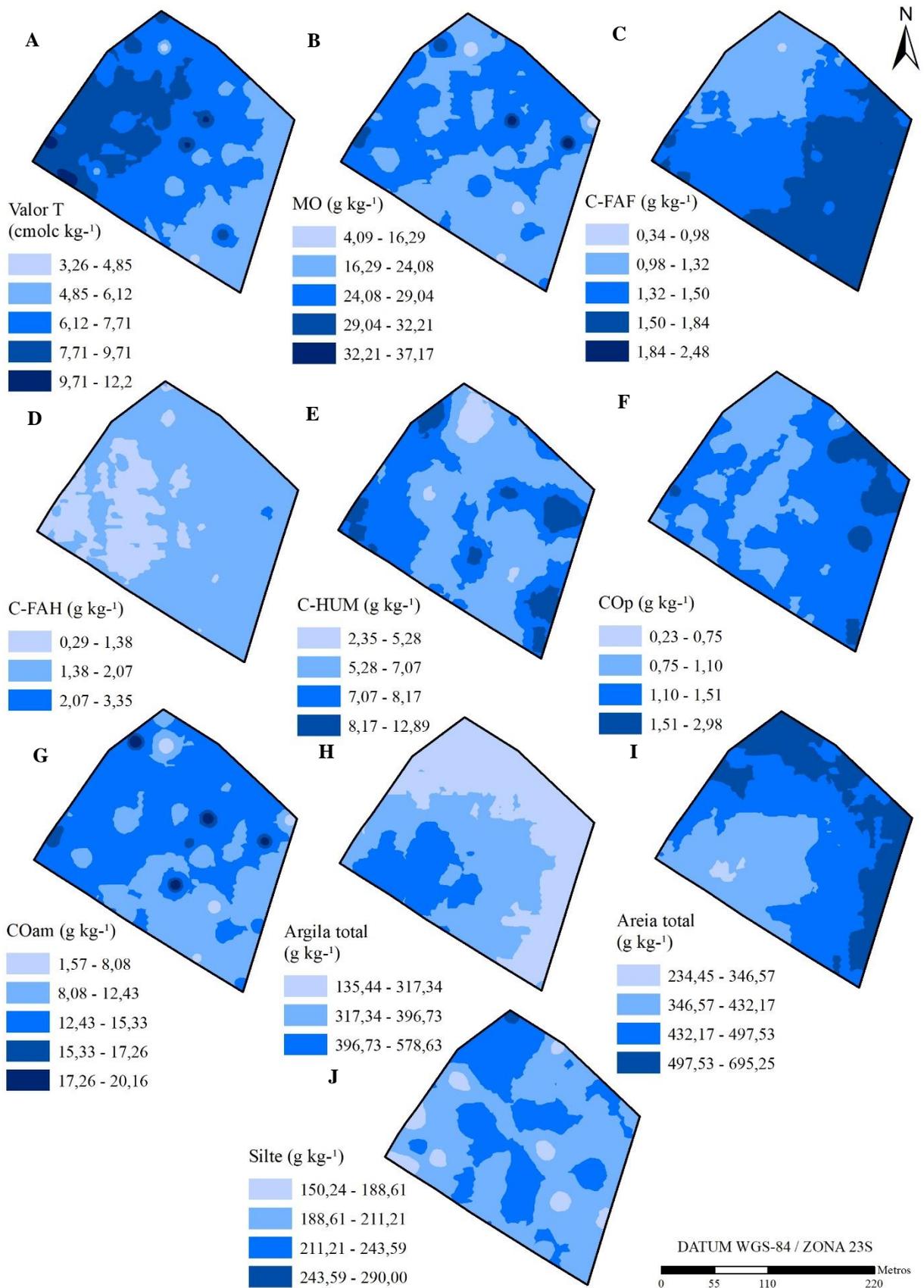


Figura 5. Mapas de variabilidade espacial gerados a partir de krigagem e cokrigagem ordinária das variáveis na camada de 0,20-0,40 m na área de cultivo de Tifton 85.

A partir da observação da distribuição espacial dos teores das frações húmicas do solo nas camadas em estudo foi possível inferir que a Tifton 85 tem contribuído na manutenção da MOS, em termos de aporte de biomassa, em partes das regiões central, sul e sudeste em 0-0,20 m e nas regiões leste e sudeste em 0,20-0,40 m. Sendo necessário maior atenção ao manejo localizado para as regiões de menor teores de frações orgânicas, principalmente na camada superficial por ser a de maior presença e contribuição de matéria orgânica.

Nas duas profundidades avaliadas houve predomínio de maiores teores de C-HUM em relação a C-FAF e C-FAH, padrão também observado por Leite et al. (2015) para Argissolos. Santos et al. (2013) e Costa et al. (2018) avaliaram as frações da MOS na região de “Mares de Morros”, no Estado do Rio de Janeiro, e perceberam além do predomínio de maiores teores de C-HUM, altos teores desta fração em áreas de pastagens com gramíneas. Esse padrão pode estar relacionado à resistência a biodegradação favorecida pela formação de complexos argilo-húmico estável, deixando a maior parte da matéria orgânica insolúvel (LEITE et al., 2015). Assim como maior presença de C-HUM relacionado ao clima tropical (SILVA et al., 2017b).

A quantificação das frações granulométricas do solo permitiu observar distribuições espaciais de frações de areia total, argila total e de silte, sendo identificada uma variação de textura desde a classe textural franco-arenosa até textura argilosa, como pode ser visto no triângulo textural (Figura 6).

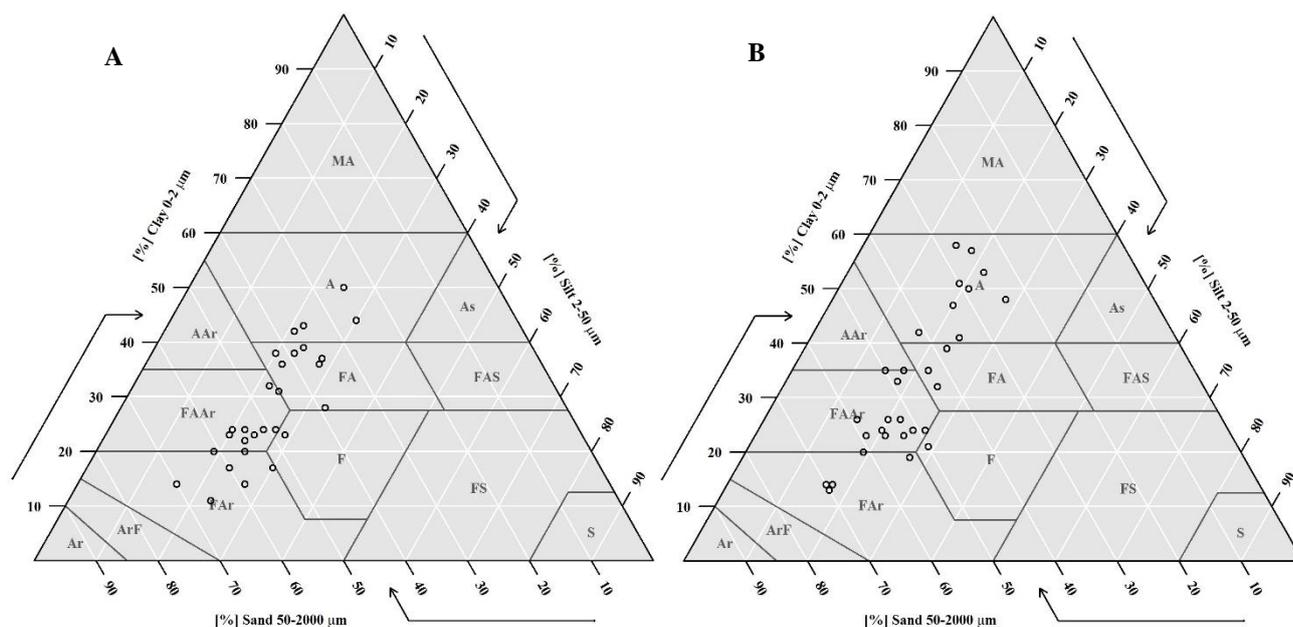


Figura 6. Classes texturais das camadas de 0-0,20 m (A) e 0,20-0,40 m (B), de acordo com Santos et al. (2015). Alguns pontos apresentaram mesmos teores de argila, areia e silte ou foram classificados com teores muito próximos, havendo sobreposição de dados nas imagens. Ar: Areia; ArF: Areia franca; FAr: Francoarenosa; F: Franca; FAAr: Franco-argiloarenosa; FS: Francossiltosa; S: Silte; AAr: Argiloarenosa; FA: Francoargilosa; FAS: Franco-argilossiltosa; A: Argila; As: Argilossiltosa; MA: Muito argilosa.

Observou-se que a variável argila total apresentou correlação significativa com o Valor T na camada superficial (Figura 3A), indicando que quanto maior a presença da fração argila, maior a capacidade de troca catiônica do solo. Esse padrão pode ser explicado pelo fato de a fração argila possuir menor diâmetro e maior superfície específica, apresentando mais cargas

na superfície, realizando interações químicas e contribuindo para a adsorção específica de cátions (MELO & ALLEONI, 2019).

Para a fração areia total foi observada correlação negativa com os Valores T, devido à ausência de cargas desfavorecendo a adsorção de íons em sua superfície. Consequentemente, isto faz com os nutrientes presentes na solução do solo realizem interações químicas fracas e sejam perdidos por percolação ao longo do perfil do solo, além da menor retenção de umidade no solo. Desta forma, nestas regiões com maiores quantidade da fração areia são verificados níveis mais baixos de fertilidade.

A correlação positiva dos valores de MF com a argila total indicou o favorecimento deste atributo no crescimento das plantas nas duas profundidades de solo, possivelmente pelas melhores condições de adsorção de nutrientes e retenção de água. A correlação negativa com as frações de areia com a MF ratifica o padrão observado para a fração areia total, discutido anteriormente, demonstrando que mesmo em menor dimensão essa fração não contribui para o aumento da produtividade. Através da análise conjunto dos mapas de variabilidade espacial das frações areia total, argila total e silte foi possível inferir que os solos de textura média são aqueles com maior probabilidade de serem verificadas altas produtividades.

Os estudos de variabilidade espacial de frações da MOS ainda são escassos, porém os que foram desenvolvidos apresentaram resultados promissores na verificação da qualidade dos solos e áreas agrícolas em estágios de degradação, permitindo o desenvolvimento de estratégias para a manutenção destas áreas. Silva et al. (2017b) verificaram a qualidade dos solos de um sistema agroflorestal no Sudeste do Brasil por meio da espacialização das frações da MOS, no qual nas condições do estudo o solo da agrofloresta foi comparável ao solo sob florestas nativas.

Marchetti et al. (2012) localizaram as áreas degradadas da Região Central da Itália a partir do estudo da variabilidade espacial da MOS. Nesse estudo os autores observaram que os baixos teores de MOS estavam relacionados a processos de erosão sob o clima mediterrâneo juntamente com práticas agrícolas intensivas e inadequadas.

A verificação da variabilidade espacial da matéria orgânica em solos agrícolas no Condado de Osijek-Baranja/Croácia indicou baixos valores de MO com variações dos seus teores ligadas diretamente as características pedogenéticas e às práticas de manejo do solo, sugerindo possíveis problemas futuros de degradação dos solos na região oeste e sudoeste do país (ĐURĐEVIĆ et al., 2019).

3.2. Zonas Homogêneas Para a Recomendação de Calagem

A partir da observação da variabilidade espacial dos atributos do solo, estratégias de manejo localizado foram estabelecidas. A geração de zonas homogêneas a partir de mapas de recomendação de calcário é um manejo que pode ser indicado em áreas de produções agrícolas no qual são observados a variabilidade espacial de atributos do solo, sobretudo do Valor T e V%, buscando a substituição de métodos convencionais de correção da acidez do solo.

Esta recomendação de manejo visa melhorar a distribuição dos insumos agrícolas e tratar de forma localizada as regiões com diferentes níveis de acidez e teores de nutrientes do solo, assim como indicados em sistemas agrícolas por Bernardi et al. (2016), Gontijo et al. (2016) e Matias et al. (2019).

A calagem além de diminuir a acidez do solo, pela neutralização de Al^{+3} , estimula a atividade microbiana, promove a fixação simbiótica de nitrogênio (N) pelas bactérias, aumenta a disponibilidade de nutrientes para as plantas, possibilita o maior crescimento radicular e promove maior mineralização da matéria orgânica (fator observado pelas correlações positivas e significativas de MO, C-FAF e COam com a necessidade de calagem (NC) na Figura 3A) (NOVAIS et al., 2007; FREIRE et al., 2013).

As correlações significativas e positivas entre a NC e a fração argila do solo (Figura 3A) podem ser explicadas por alguns fatores, como a granulometria do calcário, visto que é um

material de baixa solubilidade e quanto menor for o tamanho de suas partículas, maior será a superfície específica e, conseqüentemente, sua eficácia para a neutralização da acidez do solo (FREIRE et al., 2013). Novais et al. (2007) afirmam também que a necessidade de calagem está relacionada aos teores de argila (e ao tipo de argila) e matéria orgânica devido ao poder tampão hidrogeniônico (PTH). Os autores afirmam que solos com maior PTH (mais argilosos) necessitam de maior quantidade de calcário para reduzir a acidez dos solos quando comparados com os de menor PTH (mais arenosos).

Na Figura 7 é apresentado o mapeamento da necessidade de calagem com as doses a serem aplicadas em taxa fixa (A), em zonas homogêneas com aplicação em teores médios (B) e zonas homogêneas com aplicação em taxa variável (C) para a área de cultivo da Tifton 85.

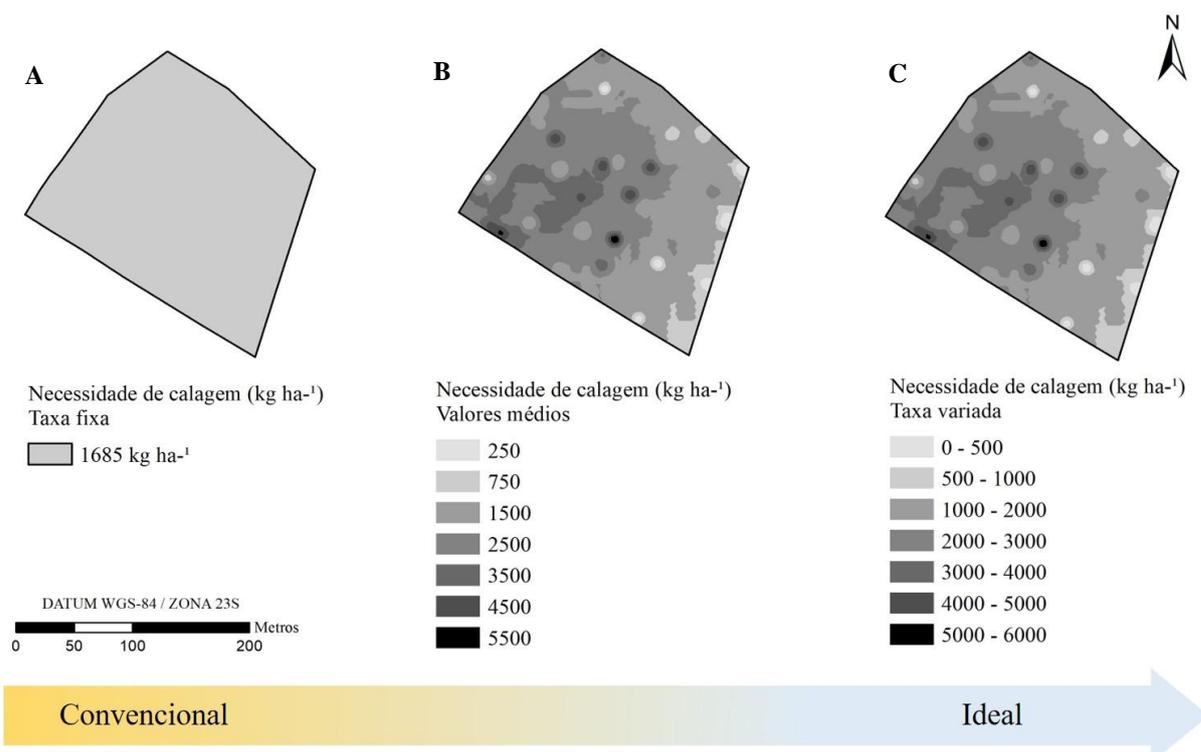


Figura 7. Mapas de recomendação de calcário em taxa fixa (A), em zonas homogêneas com aplicação em teores médios (B) e zonas homogêneas com aplicação em taxa variável (C).

Através da análise da Figura 7C verifica-se existir uma variação dos valores de aplicação de calagem dentro de cada intervalo, podendo ser realizada aplicação em taxa variada. Assim como pode ser adotado um valor médio para cada intervalo (Figura 7B) e ser realizada a aplicação uniforme dentro das zonas homogêneas. Desta maneira, observa-se que há a possibilidade de escolha do agricultor em como realizar a aplicação da calagem na área em estudo. Esta escolha sempre levará em consideração os equipamentos agrícolas disponíveis, os custos e a logística da atividade no campo.

Através da análise das Figuras 7B e 7C foi possível notar que as regiões central, oeste, sudoeste e noroeste do mapa são as que mais necessitam de aplicação de calagem. Observando a Figura 3A e as Figuras 4A e 4B verifica-se que existe uma alta relação de espacialização entre as variáveis NC, Valor T e V%, em que pode ser visto que as regiões de menor valor de SB, maior valor T e menores valores de V% são as que mais necessitam da aplicação de calcário. Estas informações implicam diretamente no desenvolvimento da cultura, uma vez que o sistema radicular da Tifton 85 é mais abundante na camada de 0-0,20 m (PIAS et al., 2015).

Uma extensa parte da região central do mapa (de alta probabilidade de apresentar alta produtividade) e oeste (região de alta probabilidade de apresentar baixa produtividade) indicam a necessidade de calagem em altas taxas. Esse padrão sugere que estas regiões apresentam potencial de produtividade maiores do que exibiram.

Através da análise das Figuras 3F e Figura 7, observam-se manchas localizadas em regiões do mapa, sobretudo norte e leste, que apresentam uma baixa probabilidade de ocorrência de alta produtividade e que mesmo assim são verificados baixos valores de necessidade de calagem. Esse padrão representa dizer que estas regiões apresentam baixos potenciais produtivos e que mesmo se aplicado maiores doses de calcário pode ser que não apresentem maiores respostas quanto a produtividade. Este fenômeno pode ser explicado pela presença de maiores frações de areia total, indicando áreas com textura mais arenosa, e pelos baixos teores de matéria orgânica, como o CO_{am}, nestas regiões.

Levando em consideração a realização de calagem nestes solos e o valor calculado de aplicação em taxa fixa como 1.685 kg ha⁻¹, verifica-se que existe uma superdosagem de calcário nestas regiões de baixo potencial produtivo, o que representa perdas para o agricultor. Em solos tropicais, o excesso de calagem pode provocar interações negativas no complexo de troca, acarretando desequilíbrio nutricional, favorecer a velocidade de decomposição da matéria orgânica, acelerando sua perda; imobilização ou redução da disponibilidade de nutrientes como fósforo, ferro, manganês, zinco, boro e cobre; alteração da relação Ca/K, com possível indução de deficiência de K (FREIRE et al., 2013).

Ainda, observou-se que existem regiões em que há uma maior necessidade de calagem, ou seja, regiões que estão recebendo menor dosagem de calcário do que deveriam (subdosagem) (Figura 8).

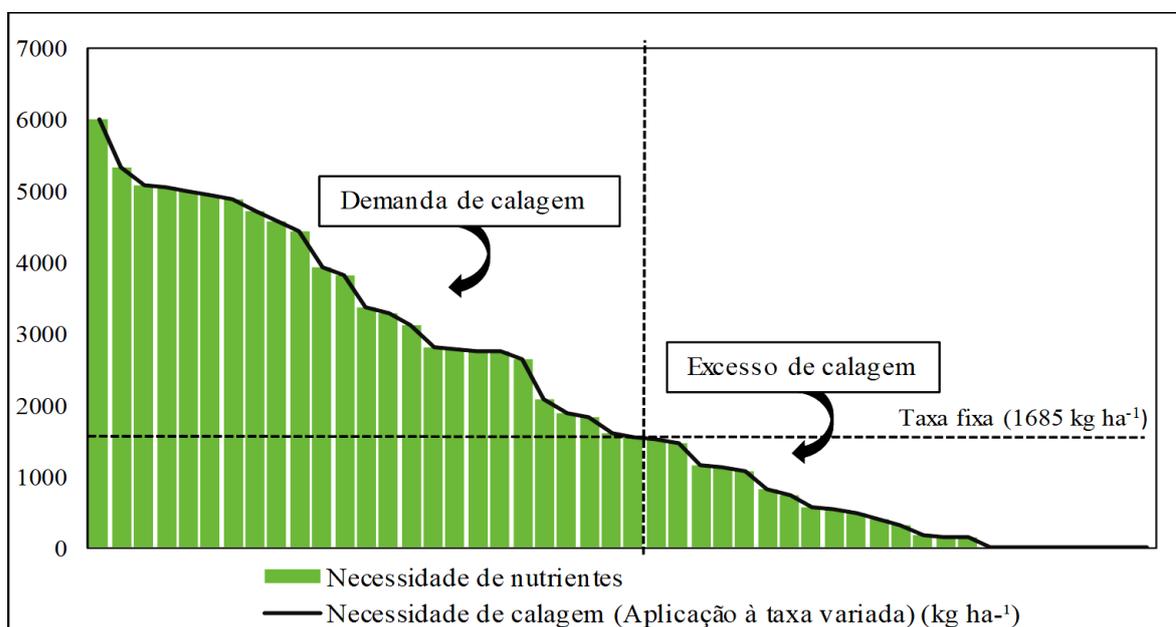


Figura 8. Necessidade de nutrientes *versus* Necessidade de calagem à taxa variada em área de cultivo de Tifton 85.

O mapeamento dos atributos do solo e da necessidade de aplicação de calcário permitiu visualizar que é possível melhorar a distribuição de calcário no solo cultivado com a Tifton 85, realizando uma redistribuição deste insumo e tornando algumas regiões potencialmente mais produtivas. Através da Tabela 3 verifica-se uma comparação na área experimental da aplicação de calagem em taxa fixa e em zonas homogêneas com aplicação em teores médios.

Tabela 3. Necessidade de calcário em taxa fixa e em zonas homogêneas com aplicação em teores médios

Região	Área (ha)	NC média nas zonas homogêneas (kg ha ⁻¹)	NC em taxa fixa (kg ha ⁻¹)
1	0,041	250	
2	0,235	750	
3	1,698	1500	
4	1,449	2500	1.685
5	0,430	3500	
6	0,052	4500	
7	0,005	5500	
Total	3,91	8.121	6.588

Entende-se que se realizada a aplicação à taxa fixa, a necessidade de calagem recomendada será de 6.588 kg ha⁻¹. Este valor representa 23,3% de aplicação a menos em comparação às zonas homogêneas com aplicação em teores médios, em que poderiam ser aplicados valores médios de NC que totalizariam 8.121 kg ha⁻¹. O mapa de recomendação de calagem sugere que a taxa de aplicação média nas zonas homogêneas deve ser até de 5.550 kg ha⁻¹ em 0,1% da área e apresentou as regiões 3 e 4 como as mais extensas em aplicações, com 1.500 kg ha⁻¹ em 43,4% da área e 2.500 kg ha⁻¹ em 37% da área, respectivamente. De maneira geral, a aplicação da NC localizada na área da Tifton 85 sugere maior aplicação de doses de calcário no solo e a aplicação que, de fato, cada região necessita.

É importante mencionar que o manejo de áreas agrícolas a partir de mapas de recomendação de calagem utilizando técnicas de AP nem sempre irá percorrer o caminho de menor consumo de insumos agrícolas para o manejo das áreas. Por muitas vezes o agricultor deverá tomar decisões como realocar a quantidade de fertilizantes ou realizar uma maior aplicação buscando alcançar o potencial produtivo dos talhões dentro da lavoura (MOLIN et al., 2015).

Segundo o Manual de calagem e adubação do Estado do Rio de Janeiro (FREIRE et al., 2013) recomenda-se para as áreas de pastagens a aplicação de calcário em cobertura (superficial) com aplicação única, preferencialmente no mês de maio. Devendo ser realizado o acompanhamento anual dos níveis de fertilidade do solo. Resultados positivos aplicando-se a calagem em área de Tifton 85 foram verificados por Coutinho et al. (2014), em que a correção da acidez do solo promoveu aumento significativo no perfilhamento e na produção da parte aérea da gramínea.

Além da geração dos mapas de recomendação de calagem, são necessários equipamentos agrícolas que trabalhem à taxa variável e que apresentem desempenhos satisfatórios justificando dessa forma o uso dessas tecnologias.

Machado et al. (2015) realizaram um levantamento de 10 experimentos em que foram avaliados 18 equipamentos agrícolas à taxa variável em relação ao desempenho de seus sistemas de controle. Foram avaliados a acurácia, o tempo de resposta, de atraso e de troca de dosagem, controle da taxa de descarga da dosagem de insumos, entre outros fatores. Percebeu-se que 59% dos equipamentos foram reprovados quanto o tempo de resposta e 53% para a acurácia, indicando que as máquinas agrícolas a taxas variáveis podem comprometer o manejo localizado. Desta forma, a garantia do desempenho destes equipamentos está altamente relacionada a ampliação de pesquisas, desenvolvimento e inovações para garantir os resultados esperados com o manejo localizado.

3.3. Zonas de Manejo (ZM)

Além do tratamento de forma localizada quanto a correção dos solos com aplicação de calcário, as zonas de manejo (ZM) podem ser criadas visando estabelecer as regiões com menores variabilidades espaciais dos atributos em estudo, os quais respondem de forma semelhantes a manejos estabelecidos dentro destas regiões. O delineamento de zonas de manejo fornece ao agricultor a possibilidade de reduzir a quantidade de amostras para futuras análises (JACINTHO et al., 2017) e permite a aplicação específica de insumos agrícolas visando o alcance de lucratividade e impactos desejados na área de cultivo (OHANA-LEVI et al., 2020).

Dentre os métodos de seleção de variáveis para o delineamento de ZM, as variáveis selecionadas devem apresentar correlações significativas com a produtividade (MOLIN et al., 2015; JACINTHO et al., 2017) ou as ZM podem ser geradas a partir de atributos do solo relacionados à matéria orgânica e aos atributos mais intrínsecos do solo, como características relacionadas ao material de origem e granulometria (MOLIN et al., 2015).

Desta maneira, ao observar as correlações lineares significativas entre a MF e os atributos do solo na camada de 0-0,20 na Figura 3A foi verificado que as variáveis selecionadas para o delineamento das ZM seriam MF, argila total, areia total, MO, C-FAF e COam. Estas variáveis foram normalizadas e a análise de componentes principais (PCA) foi aplicada. A Tabela 4 indica que os primeiros componentes explicam a maior parte da variabilidade encontrada nos dados.

Tabela 4. Percentual da variação total explicada por cada componente principal para as variáveis selecionadas na geração de ZM

PC	Autovalor	% Explicada	% Explicada acumulada
1	2,78	46,41	46,41
2	1,85	30,81	77,21
3	0,72	12,06	89,27
4	0,53	8,88	98,15
5	0,07	1,14	99,29
6	0,04	0,72	100,00

PC: Componente principal.

Observando os componentes principais de maiores contribuições (Tabela 5), constatou-se que os atributos MO, C-FAF e COam apresentaram os maiores coeficientes no PC1 e argila total e areia total no PC2, indicando serem os atributos do solo que mais colaboram no zoneamento da região em estudo em relação à produtividade.

Tabela 5. Pesos (coeficientes) das variáveis nos dois componentes principais de maiores percentuais de variação explicada

PC	MF	Argila total	Areia total	MO	C-FAF	COam
PC 1	0,350	0,337	-0,360	0,485	0,429	0,464
PC 2	-0,150	-0,578	0,558	0,378	0,201	0,385

PC: Componente principal.

Após a observação dos atributos que contribuíram na regionalização de características do solo, a análise de cluster foi realizada. Foram testados 2 e 3 agrupamentos como sugeridos por Molin et al. (2015). A indicação da criação de duas zonas de manejo (agrupamento com

k=2) apresentou-se como o ideal (Figura 9), em vista da melhor gestão localizada, logística e facilidade do agricultor em realizar o manejo dessas áreas.

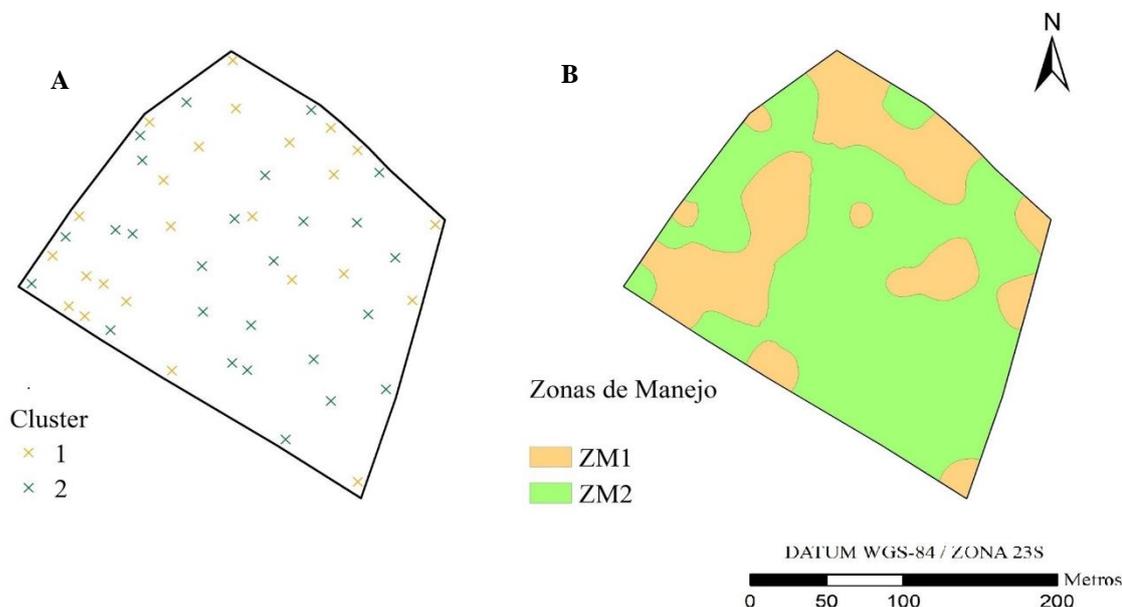


Figura 9. Clusterização dos dados por k-médias (A) e zonas de manejo geradas na área de Tifton 85 (B).

Na Tabela 6 são apresentados os valores médios dos atributos do solo e o teste de Tukey a 5% de significância ($p < 0,05$), no qual a média de cada variável entre as zonas de manejo criadas foi comparada.

Tabela 6. Valores médios dos atributos dentro de cada ZM criada e teste de comparação de médias de Tukey a 5% de significância ($p < 0,05$)

ZM	SB	T	V	Argila total	Areia total	Silte	MO	C-CAF	C-CAH	C-HUM	COp	COam	N-MOL	C-MOL
	cmol _c kg ⁻¹			g kg ⁻¹										
1	3,6 ^A	8,3 ^A	47,1 ^A	283,5 ^A	475,7 ^A	240,9 ^A	27,3 ^A	1,9 ^A	1,9 ^A	7,8 ^A	3,1 ^A	12,8 ^A	11,0 ^A	303,0 ^A
2	3,7 ^A	9,3 ^A	42,6 ^A	270,1 ^A	486,1 ^A	243,8 ^A	36,9 ^B	2,5 ^B	2,9 ^B	10,5 ^B	3,9 ^A	17,5 ^B	13,0 ^B	308,0 ^A

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem entre si na coluna a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Os valores de MF entre as zonas de manejo 1 (ZM1) e 2 (ZM2) apresentaram valores médios significativamente diferentes pelo teste de Tukey a 5% de significância (dados não apresentados). Na ZM1 foram verificadas as regiões com menores probabilidades de apresentarem produtividade acima da média, sendo regiões de mais baixa produtividade, e a ZM2 as regiões com maiores probabilidades de apresentarem alta produtividade.

Os valores médios dos atributos do solo na ZM1 e ZM2 indicaram que, dentre as variáveis utilizadas na análise multivariada, a MO, C-FAF e COam foram as maiores responsáveis pela diferença de produtividade entre as ZM. Esse padrão não representa dizer que os valores de argila total e areia total não contribuíram na produtividade, pois ambas as variáveis foram essenciais na análise multivariada. Representa apenas afirmar que a matéria orgânica e suas frações colaboraram com maiores pesos para essa diferenciação entre as zonas de manejo.

As regiões de maior presença das frações orgânicas do solo foram aquelas com maiores probabilidades de serem mais produtivas. Isto é evidente ao observar que na ZM2 foram verificados os maiores teores de MO, C-FAF e COam, C-FAH, C-HUM e N da MOL (N-MOL) quando comparados com a ZM1, com valores médios significativamente diferentes pelo teste de Tukey a 5% ($p < 0,05$).

Os valores médios das frações orgânicas do solo da área de Tifton 85 indicam que na ZM1 ocorre maior taxa de decomposição da MOS, necessitando de maior proteção dos solos nestas regiões quando comparada a ZM2. Os maiores teores médios de COam na ZM2 indicam maior recalcitrância e maiores associações entre moléculas orgânicas e a fração mineral do solo, o que torna os resíduos orgânicos mais resistentes ao ataque microbiano e, por sua vez, protege a MOS contra a decomposição.

Em vista disso, deve-se adotar práticas que incrementem os teores de C no solo, como a adubação orgânica. A adubação orgânica na área pode ser recomendada, porém em menor dosagem para a ZM2, resultando em aplicação localizada com vantagens econômicas e maior sustentabilidade. Essa menor dosagem pode contribuir para evitar impactos negativos ao solo e aos recursos hídricos quando aplicadas quantidades elevadas de adubos orgânicos, como dejetos animais (FREIRE et al., 2013).

A adubação orgânica associada a aplicação de calagem traduz-se em produções elevadas no próximo período agrícola. Colussi et al. (2014) e Gomes et al. (2015) sugerem que pode ser realizada aplicação de adubação orgânica para o aumento da produtividade do Tifton 85. Colussi et al. (2014) ao manejarem área de Tifton 85 para a fenação com tratamentos de escarificação e aplicação de diferentes adubações no solo com quatro cortes da cultura em uma estação de crescimento, verificaram maiores respostas de produtividade com cama de aves junto a reaplicação de N mineral a partir do quarto corte quando comparados com adubação mineral NPK, além do ganho de micronutrientes no solo a partir dos resíduos orgânicos.

O manejo localizado com aplicação de adubação orgânica terá como objetivo fornecer nutrientes para o solo e estabilidade a partir do processo de humificação da MOS. Na ZM1 verificou-se maior necessidade de MO com certo grau de estabilidade no solo e que forneça nutrientes para o solo. Para isto, a estrutura da MO mais adequada deverá ser a que apresenta condensação aromática gerando certo grau de estabilidade estrutural associado a grupos carboxílicos e hidroxilas que forneçam a geração de cargas na solução do solo (MELO & ALLEONI, 2019).

Na ZM2 foram verificados maiores teores de matéria orgânica humificada, exibindo maior estabilidade que a ZM1, além de maiores teores de frações orgânicas lábeis. Isto sugere que a maior produtividade agrícola da ZM2 foi beneficiada pelas substâncias húmicas, visto que estas estão intrinsicamente associadas a fração mineral do solo, favorecendo processos como o aumento da CTC do solo e a diminuição da adsorção de ânions fosfato pelas argilas 1:1 e óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al) (MELO & ALLEONI, 2019).

A necessidade de maior acumulação de C na ZM1 poderá ser realizada pelo processo de humificação da MO até que sejam alcançadas estruturas mais estáveis. Como na ZM2 são observados maiores teores das frações orgânicas da MOS, com MO mais lábil e estável que a ZM1, a adição de MO lábil será menor nesta região.

O maior valor médio de N-MOL na ZM2 pode ser devido à deposição de material com concentrações mais altas de nitrogênio (N) a partir da decomposição de Tifton 85, uma vez que nesta ZM são observadas as regiões de maiores probabilidades de possuírem maiores quantidades de biomassa vegetal.

Portanto, é possível verificar em algumas regiões da área cultivada com a Tifton 85 que o aporte de biomassa da cultura juntamente às características intrínsecas do solo tem contribuído na manutenção e conservação da MOS. Desta maneira, o manejo localizado pode

contribuir em maiores produtividades, economia e manutenção das frações orgânicas destes solos.

Por fim, destaca-se que as práticas de AP dentro de sistemas de pastagens ainda são escassas. Banhazi et al. (2012) afirmam que existem poucos exemplos de tecnologias comerciais voltadas à pecuária de precisão. Bernardi e Perez (2014) citam as principais tecnologias desenvolvidas para este setor, porém pouco usadas, como mapeamento e aplicação localizada de insumos a partir do uso de sensores de solo, utilização de sensores na estimativa de produção de forragem, intervenção sítio-específica em sistema de produção animal e monitoramento animal.

No Brasil, os principais entraves observados no cultivo de Tifton 85 para a fenação são a falta de investimento em maquinários para as atividades e a tomada de decisão com base no preço, em que não é levada em conta a qualidade do feno (REIS et al., 2013). Estes fatores acabam por intervir também no desenvolvimento e aplicação da AP. Além da problemática em âmbito mundial da escassez de conhecimentos especializados em fazendas que requerem habilidades digitais (BRONSON, 2019).

4 CONCLUSÕES

O emprego de recursos de geoestatística possibilita o uso mais eficiente de corretivos de solo e fertilizantes na produção de pastagem. A aplicação de calcário em teores médios nas regiões homogêneas representou 23,3% a mais de aplicação que à taxa fixa, indicando a aplicação que, de fato, cada região necessita e buscando alcançar o potencial produtivo dos talhões dentro da área da Tifton 85.

A distribuição espacial da MO, C-FAF, C-FAH, C-HUM, COam e COp sugere maiores teores de matéria orgânica do solo nas regiões de alta probabilidade de ocorrência de maiores produtividades.

A avaliação da variabilidade espacial dos atributos químicos, físicos e do carbono orgânico do solo através de recursos de geoestatística possibilitou a definição de zonas de manejos para pastagem. Os resultados obtidos contribuíram na partição da área de Tifton 85 em duas áreas que podem ser manejadas de formas diferenciadas, sendo indicado manejos localizados como a adubação orgânica visando à incrementação de MO no solo de maneira localizada.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, J.N.; INGRAM, J.S.I. **Tropical soil biology and fertility: a handbook of methods**. Wallingford: CAB International, 1989. 171 p.
- ARAÚJO, E. D.; BORGES, A. C.; DIAS, N. M.; RIBEIRO, D. M. Effects of gibberellic acid on Tifton 85 bermudagrass (*Cynodon* spp.) in constructed wetland systems. **PLoS ONE**, v. 13, n. 10, e0206378, 2018. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206378>.
- BANHAZI, T. M.; LEHR, H.; BLACK, J. L.; CRABTREE, H.; SCHOFIELD, P.; TSCHARKE, M.; BERCKMANS, D. Precision Livestock Farming: an international review of scientific and commercial aspects. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 5, n. 3, p. 1-9, 2012.
- BENITES, V. M.; MADARI, B.; MACHADO, P. L. O. A. **Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo: um procedimento simplificado de baixo custo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 7 p. (Embrapa Solos. Comunicado técnico, 16).
- BERNARDI, A. C. C.; PEREZ, N. B. Precision agriculture for pastures. In: BERNARDI, A. C. C. et al. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2014. 546 p.
- BERNARDI, A. C. C.; BETTIOL, G. M.; FERREIRA, R. P.; SANTOS, K. E. L.; RABELLO, L. M.; INAMASU, R. Y. Spatial variability of soil properties and yield of a grazed alfalfa pasture in Brazil. **Precision Agriculture**, v. 17, p. 737–752, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9446-9>.
- BRONSON, K. Looking through a responsible innovation lens at uneven engagements with digital farming. **NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences**, v. 90–91, 100294, 2019.
- 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 soil. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.1501-1511, 1994. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>.
- CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTTI, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Sci. Soc. Am., J.**, v.56, p. 777-783, 1992.
- COSTA, E. M.; TASSINARI, W. S.; PINHEIRO, H. S. K.; BEUTLER, S. J.; ANJOS, L. H. C. Mapping Soil Organic Carbon and Organic Matter Fractions by Geographically Weighted Regression. **Journal of Environmental Quality**, v. 47, p. 718–725, 2018. <http://dx.doi.org/10.2134/jeq2017.04.0178>.
- COUTINHO, E. L. M.; FRANCO, H. C. J.; ORIOLI JUNIOR, V.; PASQUETTO, J. V. G.; PEREIRA, L. S. Calagem e adubação potássica para o capim-Tifton 85. **Bioscience Journal**, v. 30, p. 101-111, 2014.
- COLUSSI, G.; SILVA, L. S.; MINATO, E. A. Escarificação e adubação orgânica: efeito na recuperação estrutural de solo produzindo Tifton 85. **Ciência Rural**, v. 44, n. 11, p. 1956-1961, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20131670>.

DAY, P. R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, v. 1, p. 545-556, 1965.

DEVIDE, A. C. P.; CASTRO, C. M.; RIBEIRO, R. L. D.; ABOUD, A. C. S.; PEREIRA, M. G.; RUMJANEK, N. G. Environmental history of the Paulista Paraíba Valley, Brazil. **Revista Biociências**, v. 20, n. 1, p. 12-29, 2014.

DIAS-FILHO, M.B. **Diagnóstico das pastagens no Brasil**. 1. ed. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2014. 38 p.

DONALD, G.E.; SCOTT, J.M.; VICKERY, P.J. Satellite derived evidence of whole farmlet and paddock responses to management and climate. **Animal Production Science**, vol. 53, n. 8, p. 699–710, 2013. <http://dx.doi.org/10.1071/AN11179>.

ĐURĐEVIĆ, B.; JUG, I.; JUG, D.; BOGUNOVIĆ, I.; VUKADINOVIĆ, V.; STIPEŠEVIĆ, B.; BROZOVIĆ, B. Spatial variability of soil organic matter content in Eastern Croatia assessed using different interpolation methods. **Int. Agrophys.**, v. 33, p. 31-39, 2019. <http://dx.doi.org/10.31545/intagr/104372>.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – Embrapa, 2020. **Pastagens**. <https://www.embrapa.br/agrobiologia/pesquisa-e-desenvolvimento/pastagens> (acesso em 05 de julho 2020).

ESRI (Environmental Systems Research Institute) Inc. **ArcGIS® 10.5**: New Release Transforms Enterprise GIS. Redlands, 2016.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO, 2015. **Status of the world's soil resources: main report**. 650 p. <http://www.fao.org/documents/card/en/c/c6814873-efc3-41db-b7d3-2081a10ede50/> (acesso em 05 de julho 2020).

FREIRE, L. R et al. **Manual de calagem e adubação do Estado do Rio de Janeiro**. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa; Seropédica, RJ: Editora Universidade Rural, 2013. 430 p.

GOMES, E. P.; RICKLI, M. E.; CECATO, U.; VIEIRA, C. V.; SAPIA, J. G.; SANCHES, A. C. Produtividade de capim Tifton 85 sob irrigação e doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 4, p. 317–323, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n4p317-323>.

GONTIJO, I.; SANTOS, E. O. J.; PARTELLI, F. L.; GONTIJO, A. B. P. L.; PIRES, F. R. Determination of homogeneous zones for liming recommendations of black pepper using geostatistics. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 10, p. 918-924, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n10p918-924>.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 560 p.

JACINTHO, J. L.; FERRAZ, G. A. S.; SILVA, F. M.; SANTOS, S. A. Management zones in coffee cultivation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 94-99, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n2p94-99>

JOURNEL, A. G.; RAO, S. E. **Deriving conditional distributions from ordinary kriging**. Palo Alto: Stanford Center for Reservoir Forecasting. 1996, 25 p. (Report 9).

JUG, D.; JUG, I.; BROZOVIĆ, B.; VUKADINOVIĆ, V.; STIPEŠEVIĆ, B.; ĐURĐEVIĆ, B. The role of conservation agriculture in mitigation and adaptation to climate change. **Poljoprivreda**, v. 24, p. 35-44, 2018.

LEITE, L. F. C.; FERREIRA, J. S. F.; VELOSO, M. E. C.; MOUSINHO, F. E. P.; ROCHA JUNIOR, A. F. Variabilidade espacial das frações da matéria orgânica do solo em área degradada sob recuperação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 4, p. 394-401, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n4p394-401>.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A.; BEUTLER, S. J.; ANJOS, L. H. C. Carbon, nitrogen and natural abundance of $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ of light-fraction organic matter under no-tillage and crop-livestock integration systems. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 34, n. 4, p. 465–472, 2012.

MACHADO, O. D. C.; ALONÇO, A. S.; FRANCETTO, T. R.; CARPES, D. P. Acurácia e tempos de resposta de máquinas para aplicação de defensivos agrícolas à taxa variável. **Ciência Rural**, online. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20130899>.

MARCHETTI, A.; PICCINI, C.; FRANCAVIGLIA, R.; MABIT, L. Spatial Distribution of Soil Organic Matter Using Geostatistics: A Key Indicator to Assess Soil Degradation Status in Central Italy. **Pedosphere**, v. 22, n. 2, p 230–242, 2012.

MATIAS, S. S. R.; MATOS, A. P.; LANDIM, J. S. P.; FEITOSA, S. F.; ALVES, M. A. B.; SILVA, R. L. Recomendação de calagem com base na variabilidade espacial de atributos químicos do solo no Cerrado brasileiro. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 4, p. 896-907, 2019. <https://doi.org/10.19084/rca.17735>.

MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. **Química e Mineralogia do Solo - Conceitos Básicos e Aplicações**. 3. reimp. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. único, 2019. 1381 p.

MELLO, J. M.; BATISTA, J. L. F.; RIBEIRO JÚNIOR, P. J.; OLIVEIRA, M. S. Adjustment and selection of spatial models of semivariograma envisaging *Eucalyptus grandis* volumetric estimates. **Scientia Forestalis**, n. 69, p. 25-37, 2005.

MOHARANA, P. C.; JENA, R. K.; PRADHAN, U. K.; NOGIYA, M.; TAILOR · B. L.; SINGH · R. S.; SINGH, S. K. Geostatistical and fuzzy clustering approach for delineation of site-specific management zones and yield-limiting factors in irrigated hot arid environment of India. **Precision Agriculture**, v. 21, p. 426–448, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09671-9>.

MOEYS, J. **Soiltexture**: Functions for Soil Texture Plot, Classification and transformation, 2018. R package version 1.5.1. <https://CRAN.R-project.org/package=soiltexture>.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. F. **Agricultura de precisão**. 1.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 238 p.

MOREIRA, A. L.; FAGUNDES, J. L.; YOSHIHARA, E.; Alfredo Acosta BACKES, A. A.; BARBOSA., L. T.; HEINRICH, R. Production of sheep grazing on nitrogen-fertilized tifton 85 grass in continuous stocking. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, v. 36, n. 1, p. 63-69, 2014. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v36i1.21935>.

NOGUEIRA, S. F.; PEREIRA, B.F.F.; GOMES, T.M.; PAULA, A.M; SANTOS, J.A.; MONTES, C.R. Treated sewage effluent: Agronomical and economical aspects on bermudagrass production. **Agricultural Water Management**, v. 116, p. 151–159, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2012.07.005>.

NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do Solo**. 1. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 1017 p.

OHANA-LEVI, N.; BEN-GAL, A.; PEETERS, A.; TERMIN, D.; LINKER, R.; BARAM, S.; RAVEH, E.; PAZ-KAGAN, T. A comparison between spatial clustering models for determining N-fertilization management zones in orchards. **Precision Agriculture**, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09731-5>.

PIAS, O. H. C. et al. Mapeamento da produção de massa seca do Tifton 85 e sua correlação com os atributos químicos do solo. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 36, p. 2093-2104, 2015.

PINHEIRO, H. S. K.; CARVALHO JUNIOR, W.; CHAGAS, C. S.; ANJOS, L. H. C.; OWENS, P. R. Prediction of Topsoil Texture Through Regression Trees and Multiple Linear Regressions. **Rev Bras Cienc Solo**, v. 42, e0170167, 2018. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20170167>.

REIS, R. A.; BERNARDES, T. F.; SIQUEIRA, G. R. **Forragicultura. Ciência, Tecnologia e Gestão dos recursos Forrageiros**. 1. ed. Jaboticabal: Gráfica e editora multipress, v. único, 2013. 714p.

REZENDE, J. O. **Consequências da aplicação de vinhaça sobre algumas propriedades físicas de um solo Aluvial (estudo de um caso)**. 112p. 1979. Tese (Doutorado em Agronomia - Solos e Nutrição de Plantas). Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba.

ROSCOE, R.; MACHADO, P. L. O. A. **Fracionamento Físico do Solo em Estudos da Matéria Orgânica**. 1. ed. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. 86p.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

SANTOS, R. D. et al. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 7. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2015. 101 p.

SANTOS, D. C.; FARIAS, M. O.; LIMA, C. L. R.; KUNDE, R. J.; PILLON, C. N.; FLORES, C. A. Fracionamento químico e físico da matéria orgânica de um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso. **Ciência Rural**, v. 43, p. 838-844, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782013005000037>.

SERRANO, J. M.; BARRETO, S.; SHAHIDIAN, S.; SILVA, J. M. Evaluation of the optical OptRx® crop sensor for monitoring the spatial and temporal variability of pastures. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 39, n. 2, p. 261-280, 2016. <http://dx.doi.org/10.19084/RCA15101>.

SILVA, A. C. C.; LIMA, L. A.; ALMEIDA, W. F.; THEBALDI, M. S.; SILVA, A. C. Efecto del riego deficitario sobre la producción de Tiftón 85. **Rev. FCA UNCUYO**, v. 49, n. 2, p. 117-126, 2017a.

SILVA, E. R. O.; BARROS, M. M.; PEREIRA, M. G.; GOMES, J. H. G.; SOARES, S. C. Effects of spatial variability of soil chemical parameters on Tifton 85 grass yield. **Revista Caatinga**, v. 33, n. 1, p. 236-245, 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252020v33n125rc>.

SILVA, C. S.; PEREIRA, M. G.; DELGADO, R. C.; ASSUNÇÃO, S. A. Spatialization of fractions of organic matter in soil in an Agroforestry System in the Atlantic Forest, Brazil. **Cerne**, v. 23 n. 2, p. 249–256, 2017b.

SIMÕES, C. R.; ROSSIELLO, R. O. P.; GRACIOSA, M. G.; MACHADO, M. L.; SILVA, C. F. Multispectral imaging for leaf area index and dry mass evaluation of ‘Tifton 85’ bermudagrass under nitrogen fertilization. **Ciência Rural**, v. 45, n. 4, p. 697-703, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20131424>.

SWIFT, R. S. Organic matter characterization. In: SPARKS, D. L. (Ed). **Methods of soil analysis**. America Society of Agronomy, 1996. p. 1011–1020.

VIEIRA, S. R. et al. Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v. 51, n. 3, p. 1-75, 1983.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.) **Applications of soil physics**. Academic press, 1980. p. 319–344.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. 1. ed. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2013. 215 p.

YAMAMOTO, J. K. Calculation of Probability Maps Directly from Ordinary Kriging Weights. **Geol. USP, Sér. cient.**, v. 10, n. 1, p. 3-14, 2010.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. **A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil**. Communications in Soil Science and Plant Analysis, New York, v. 19, n. 13, p. 1467-1476, 1988.

**CAPÍTULO II: DELINEAMENTO DE ZONAS DE MANEJO NA
PRODUÇÃO DE BANANA COM BASE NA VARIABILIDADE
ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO DE BAIXA FERTILIDADE
NATURAL**

RESUMO

SILVA, Eudocio Rafael Otavio da. **Delineamento de zonas de manejo na produção de banana com base na variabilidade espacial de atributos do solo de baixa fertilidade natural**. 2021. 92p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2021.

Estudos que visam a análise das relações espaciais dos atributos do solo em áreas de cultivo de bananeiras ainda são pouco explorados, entretanto são imprescindíveis devido ao seu papel na conservação e qualidade do solo e manejo da cultura. O objetivo deste trabalho foi investigar a variabilidade espacial de atributos do solo em área de cultivo da banana BRS Princesa no Sudeste brasileiro e definir zonas de manejo para recomendações de adubações localizadas utilizando ferramentas geoestatísticas e multivariadas. O experimento foi realizado em área de cultivo da banana BRS Princesa, localizada no Setor de Horticultura da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica-RJ. Foi realizada a amostragem de 60 pontos georreferenciados ao longo das linhas e entrelinhas do bananal e em cada ponto foram coletadas amostras de terra deformadas nas profundidades de 0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m. Realizou-se as análises dos atributos do solo pH, Ca, Mg, Al, Na, K trocáveis, P assimilável, acidez potencial (H + Al), soma de bases trocáveis (SB), capacidade de troca catiônica total (Valor T), saturação por bases (V%), composição granulométrica: areia total, argila total e silte, carbono orgânico total (COT) e fracionamento granulométrico da matéria orgânica do solo (MOS) nas camadas superficiais (0-0,05; 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m), no qual foi obtido o carbono orgânico particulado (COp) e o carbono orgânico associado aos minerais (COam). Os dados foram submetidos à análise exploratória e estatística descritiva, seguidos do estudo geoestatístico em que cada variável foi submetida a modelagem de semivariograma teórico e krigagem ordinária, obtendo-se os mapas de variabilidade espacial. Realizou-se análise multivariada para o delineamento das zonas de manejo (ZM) a partir da análise de componentes principais (PCA) seguidas da análise de agrupamento não hierárquico (análise de cluster), utilizando o método k-médias. Os resultados indicaram que o manejo do bananal a partir de diferentes densidades de plantas por hectare pode explicar a variação espacial dos atributos químicos do solo. Através da análise das relações de Ca/Mg e K/Mg observaram-se valores muito abaixo da faixa de adequabilidade em todos os pontos no bananal, indicando desequilíbrio nutricional no solo. As relações espaciais entre os atributos do solo verificados na modelagem dos semivariogramas e nos mapas de variabilidade espacial sugerem manejos localizados para a adubação e correção do solo. Foi possível delinear zonas de manejo utilizando métodos multivariados com base na variabilidade espacial de atributos do solo na área experimental. As variáveis V%, COT, COam, COp, argila total e areia total foram os atributos do solo de maior contribuição para a geração das zonas de manejo. As ZM1 nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m e ZM2 0,20-0,40 m necessitam de menores quantidades de adubação orgânica e correção por fertilizantes em comparação a ZM2 nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m e ZM1 0,20-0,40 m, sendo estas últimas as zonas de maior necessidade de incremento de matéria orgânica no solo.

Palavras-chave: agricultura de precisão, banana BRS Princesa, geoestatística.

ABSTRACT

SILVA, Eudocio Rafael Otavio da. **Design of management zones in banana production based on the spatial variability of soil attributes of low natural fertility**. 2021. 92p. Dissertation (Master Science in Agricultural and Environmental Engineering). Institute of Technology, Engineering Department, Rural Federal University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2021.

Studies that aim to analyze the spatial relationships of soil attributes in areas of banana cultivation are still little explored, however they are essential due to their role in soil conservation and quality and crop management. The objective of this work was to investigate the spatial variability of soil attributes in the BRS Princesa banana cultivation area in southeastern Brazil and to define management zones for localized fertilization recommendations using geostatistical and multivariate tools. The experiment was carried out in a banana cultivation area BRS Princesa, located in the Horticulture Sector of the Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica-RJ. 60 georeferenced points were sampled along the lines and lines between the bananal and at each point, deformed soil samples were collected at depths of 0-0.05; 0.05-0.10; 0.10-0.20 and 0.20-0.40 m. Analyzes of soil attributes pH, Ca, Mg, Al, Na, K exchangeable, assimilable P, potential acidity (H + Al), sum of exchangeable bases (SB), total cation exchange capacity (Value T) were performed, base saturation (V%), granulometric composition: total sand, total clay and silt, total organic carbon (TOC) and granulometric fractionation of soil organic matter (SOM) in the superficial layers (0-0.05; 0.05-0.10 and 0.10-0.20 m), in which particulate organic carbon (POC) and organic carbon associated with minerals (MAOC) were obtained. The data were submitted to exploratory analysis and descriptive statistics, followed by the geostatistical study in which each variable was subjected to modeling of theoretical semivariogram and ordinary kriging, obtaining spatial variability maps. Multivariate analysis was performed to design the management zones (MZ) from the principal component analysis (PCA) followed by the non-hierarchical cluster analysis (cluster analysis), using the k-means method. The results indicated that the management of bananal from different plant densities per hectare can explain the spatial variation of the chemical attributes of the soil. Through the analysis of the Ca/Mg and K/Mg ratios, values were well below the adequacy range at all points in the banana plantation, indicating nutritional imbalance in the soil. The spatial relationships between soil attributes verified in the modeling of semivariograms and in spatial variability maps suggest localized management for fertilization and soil correction. It was possible to design management zones using multivariate methods based on the spatial variability of soil attributes in the experimental area. The variables V%, TOC, MAOC, POC, total clay and total sand were the attributes of the soil that most contributed to the generation of management zones. The MZ1 in the layers of 0-0.05, 0.05-0.10 and 0.10-0.20 m and MZ2 0.20-0.40 m require less amounts of organic fertilizer and correction by fertilizers compared to MZ2 in the layers of 0-0.05, 0.05-0.10 and 0.10-0.20 m and MZ1 0.20-0.40 m, the latter being the areas most in need of increasing organic matter in the ground.

Key words: precision agriculture, banana BRS Princesa, geostatistics.

1 INTRODUÇÃO

A banana representa o segundo maior valor de produção entre as fruteiras cultivadas no estado do Rio de Janeiro (MALDONADO et al., 2016). Em 2019 o município de Seropédica, localizado na Baixada Fluminense do Estado do Rio de Janeiro, produziu 2.997 toneladas de banana e 727,0 hectares em área colhida, com rendimento de 4,12 t ha⁻¹, correspondendo a quase ¼ do rendimento nacional (14,75 t ha⁻¹) (EMBRAPA, 2020a). Estes valores justificam a busca por novos investimentos na implantação e manejos dos bananais.

Grande parte dos solos do Estado do Rio de Janeiro é formada por sedimentos previamente intemperizados que levam a formação de solos com baixa fertilidade natural. Adicionalmente para a ordem dos Argissolos, outra limitação é verificada, a elevada susceptibilidade à erosão, em especial quando submetidos a intensa mobilização (FREIRE et al., 2013). Desta maneira, o manejo e o gerenciamento de solos nestas regiões mostram-se desafiadores.

Diferentemente de atributos do solo como a textura e a mineralogia que são intrinsicamente relacionadas ao material de origem, os solos podem ser manejados visando promover a permanência da matéria orgânica do solo (BARBOSA et al., 2020). Estudos que visam a análise das relações espaciais dos atributos do solo em áreas de cultivo de bananeiras ainda são pouco explorados, entretanto são imprescindíveis devido ao seu papel na conservação e qualidade do solo e manejo da cultura, sendo uma potencial ferramenta à agricultura de precisão.

A agricultura de precisão (AP) caracteriza-se como a gestão e gerenciamento localizado na lavoura. Levando esta definição para a bananicultura é possível observar que há carência de informações e dados que indiquem o uso destes métodos para este setor. São escassos os trabalhos que investigam a variabilidade espacial de atributos do solo e da cultura da banana (SÁNCHEZ et al., 2010; UCHÔA et al., 2011; ZUCOLOTO et al., 2011a; ZUCOLOTO et al., 2011b; BATISTA et al., 2019), paralelamente dentro deste setor tem-se buscado e investidos novos métodos e tecnologias para o manejo dos bananais (EMBRAPA, 2020b), visto que o Brasil é o quinto maior produtor de banana do mundo (IBGE, 2019).

Todos esses fatores podem estar diretamente relacionados ao fato de a agricultura de precisão ainda privilegiar as grandes culturas como os cereais (BRONSON, 2019); pelo fato de a bananicultura ser realizada principalmente por pequenos agricultores e de perfil familiar; e pela ideia de a AP ser atribuída diretamente a tecnologias de alto custo e possivelmente afastar os bananicultores, entre outros fatores.

De fato, as abordagens mais tradicionais da AP como a amostragem georreferenciada podem não ser as mais economicamente atrativas aos bananicultores, entretanto estudos desta natureza são totalmente necessários para que seja possível buscar alternativas mais econômicas e práticas, possibilitando a gestão localizada dos bananais mesmo tratando-se de pequenas lavouras. A gestão localizada pode ser realizada por uma ampla variedade de métodos presentes no contexto da agricultura digital, como o uso de sensores, veículos aéreos não tripulados (VANTs), uso de imagens de satélite, amostragens de solo georreferenciadas.

Estas abordagens buscam entender a variabilidade espacial de atributos do solo e da cultura existente na lavoura e visam a delimitação de regiões que possam ser realizados manejos localizados e específicos, como as zonas de manejo. Na literatura a seleção das variáveis para a criação das zonas de manejo pode ser por meio dos atributos relacionados aos fatores intrínsecos do solo e a matéria orgânica (MOLIN et al., 2015), às variáveis correlacionadas com a produtividade (JACINTHO et al., 2017).

Ou mesmo realizando-se a investigação de todo o conjunto de dados a partir de análise multivariada, sendo selecionadas as variáveis de maiores contribuições (SANTI et al., 2012). Existem diferentes métodos multivariados que podem ser utilizados para a geração de zonas de

manejo, tais como a análise de componentes principais (PCA) (SANTI et al., 2012), o algoritmo de agrupamento fuzzy k-means (RODRIGUES & CORÁ, 2015) e k-médias (RODRIGUES JUNIOR et al., 2011), a análise de componentes principais ponderados geograficamente juntamente ao algoritmo de agrupamento de médias difusas possibilísticas (MOHARANA et al., 2020), entre outros.

As diferentes abordagens visam investigar a variabilidade espacial da área de cultivo e a identificar as regiões que apresentam uma mínima variabilidade espacial e que possa ser gerida de forma homogênea em subunidades. Realizando-se a gestão localizada com maior eficácia e de acordo com a necessidade de cada subunidade, tomando decisões mais assertivas, possivelmente com menor impacto ambiental, identificando as regiões mais e menos produtivas e realizando “ações de convívio” em locais que apresentam naturalmente baixos potenciais produtivos.

Desta maneira, o objetivo deste trabalho foi i) investigar a variabilidade espacial de atributos do solo em área de cultivo da banana BRS Princesa no Sudeste brasileiro e ii) definir zonas de manejo para recomendações de adubações localizadas no bananal utilizando ferramentas geoestatísticas e multivariadas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área Experimental e Histórico

O experimento foi realizado em área de cultivo da banana BRS Princesa, localizada no Setor de Horticultura da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Seropédica-RJ (22° 45' 08,62'' S e 43° 40' 28,50'' W). A área possui 1829,8 m², relevo suave ondulado, altitude de 27 m e solo classificado como Argissolo Amarelo (SANTOS et al., 2018). O clima da região é classificado Aw, tropical chuvoso com inverno seco, segundo a classificação de Köppen, a temperatura média é 23,5° C e precipitação média anual de 1.354 mm (INMET, 2021).

O bananal foi implantado em agosto de 2014 com seis diferentes densidades de plantio (1200, 1600, 2000, 2400, 2800 e 3200 plantas por hectare). Antes do plantio das mudas realizou-se calagem e adubação de plantio com 80 g de fertilizante fosfato e 10 L de esterco bovino por cova. Posteriormente, realizou-se adubação de cobertura ao longo do crescimento das bananeiras, em que foram utilizados para suprimento de N, P e K os fertilizantes ureia (45% de N), cloreto de potássio (KCl, 60% K₂O) e Biorin® (18% de P; 15% de Ca; e micronutrientes), todos aplicados no entorno da muda a 40 cm de distância. Além da adubação mineral suplementar, foi realizada uma adubação orgânica de cobertura no início da fase produtiva da bananeira utilizando-se esterco bovino curtido, no qual aplicou-se 20 L por touceira.

O preparo do solo para a implementação do bananal foi realizado a partir de uma aração, duas gradagens, uma subsolagem a 50 cm de profundidade e sulcamento. A irrigação era realizada por aspersão fixa de subcova nos primeiros anos de cultivo do bananal, entretanto atualmente a área experimental não possui mais um sistema de irrigação. Para mais detalhes sobre a implantação do experimento e o adensamento das bananeiras consultar Lanza et al. (2017).

2.2 Coleta dos Dados em Campo e Análise Laboratorial

Foram realizadas coletas de 60 pontos georreferenciados ao longo das linhas e entrelinhas do bananal, gerando uma grade amostral com distâncias entre pontos de aproximadamente 6,8 x 6,0 m, consistindo em uma amostragem sistemática com grade semirregular. Este tipo de grade foi gerada a partir de grade regular, entretanto foi modificada (ou seja, os espaçamentos entre pontos amostrais foram alterados em regiões do bananal) devido a interferências da cultura no georreferenciamento na área experimental. Todos os pontos relacionados aos locais de amostragem foram georreferenciados e coletados com a utilização de Estação Total Leica, Série TPS300 Basic, nas coordenadas cartesianas bidimensionais UTM para a zona 23S.

Em cada ponto georreferenciado foram coletadas amostras de terra deformadas nas profundidades de 0-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m (Figura 1). As amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas por peneira de 2 mm de malha para a obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA) (TEIXEIRA et al., 2017).

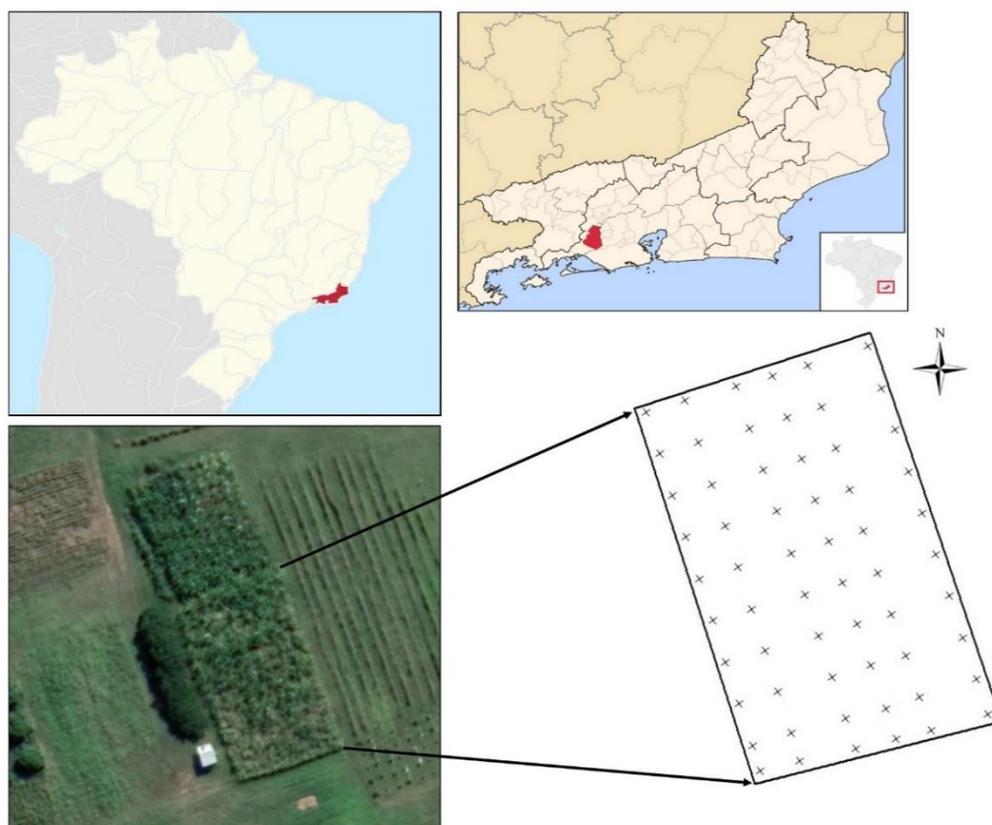


Figura 1. Área experimental localizada no município de Seropédica-RJ e distribuição da malha amostral para investigação espacial de atributos do solo no bananal (Fonte: ABREU, 2006; GOOGLE EARTH, 2021).

Em seguida foram realizadas as análises de solo: pH, utilizando-se a relação 1:2,5 de solo em água, Ca, Mg, Al, Na, K trocáveis, P assimilável, acidez potencial H + Al, soma de bases trocáveis (SB), capacidade de troca catiônica total (Valor T) e saturação por bases (V%) segundo Teixeira et al. (2017). A frações granulométricas de areia total, argila total e silte foram obtidas conforme modificação proposta por Rezende (1979) e pelo método da pipeta (DAY, 1965). Foram obtidos os seguintes atributos da matéria orgânica do solo (MOS): carbono orgânico total (COT) segundo Yeomans e Bremner (1988) e fracionamento granulométrico da matéria orgânica do solo (MOS) nas camadas superficiais (0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m) segundo Cambardella e Elliott (1992), no qual foi obtido o carbono orgânico particulado (COp). O carbono orgânico associado aos minerais (COam) foi obtido a partir da diferença entre COT e COp.

2.3 Estatística Descritiva e Geostatística

Utilizando o software PAST 3.5 os dados foram submetidos à análise exploratória e estatística descritiva, obtendo-se os valores mínimos, máximos, médios, mediana, de assimetria e curtose, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV%) segundo Warrick e Nielsen (1980). Foi verificado a presença de outliers, além da realização de teste de normalidade de Shapiro-Wilk a 5% de significância ($p < 0,05$).

O estudo geostatístico foi realizado a partir do software R Studio 3.5.1 utilizando os pacotes *geoR*, *gstat* e *sp*, em que cada variável foi submetida a modelagem de semivariograma

teórico (Equação 1) e foram testados os modelos esférico, exponencial e gaussiano (Equações 2, 3 e 4, respectivamente) (OLEA, 1999).

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

Em que: $\hat{\gamma}(h)$ é a semivariância estimada; $N(h)$ é o número de pares experimentais de observações; e $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$ são os valores dos atributos medidos na posição x_i e $x_i + h$, separados por um vetor h (distância entre amostras).

$$\begin{aligned} \text{Modelo esférico: } \hat{\gamma}(h) &= C_0 + C \left[1,5 \frac{h}{a} - 0,5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \text{ para } h < a \\ \hat{\gamma}(h) &= C_0 + C \text{ para } h \geq a \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{Modelo exponencial: } \hat{\gamma}(h) = C_0 + C \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right] \quad (3)$$

$$\text{Modelo gaussiano: } \hat{\gamma}(h) = C_0 + C \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{h}{a}\right)^2\right) \right] \quad (4)$$

Em que: C_0 é o efeito pepita, valor teórico de semivariância obtido na distância zero entre as amostras; $C_0 + C$ é o patamar, semivariância máxima obtida no semivariograma; a é o alcance.

Após testados os modelos esférico, exponencial e gaussiano, estes foram ajustados pelos métodos da Máxima Verossimilhança e Mínimos Quadrados Ordinários e submetidos à validação cruzada dos dados. O melhor modelo ajustado de semivariograma de cada variável em estudo foi determinado pelo valor do erro médio reduzido (\overline{ER}) mais próximo de zero e o desvio padrão do erro médio reduzido (S_{ER}) mais próximo de um dentre os modelos. No método da Máxima Verossimilhança o valor do Critério de Informação de Akaike (AIC) também foi considerado na escolha do modelo ajustado.

A definição do modelo ajustado de semivariograma permitiu a obtenção dos parâmetros variográficos efeito pepita, patamar e alcance, podendo ser verificado o grau de dependência espacial (GDE) segundo as pressuposições de Cambardella et al. (1994): GDE classificado como forte quando o efeito pepita representa menos de 25% do patamar, GDE moderado quando estiver entre 25 e 75% e baixa dependência espacial quando o efeito pepita estiver acima de 75% do patamar. Verificada a continuidade espacial entre as amostras, realizou-se a inferência espacial nos locais não amostrados por meio da krigagem ordinária utilizando o software ArcGis 10.5 (ESRI, 2016), obtendo-se os mapas de variabilidade espacial.

Realizou-se a cokrigagem ordinária nas variáveis que não apresentaram boas estimativas espaciais. Para isto, foi verificada correlação significativa entre os atributos de interesse e realizou-se o semivariograma cruzado entre a variável primária (atributo de interesse e de baixa continuidade espacial) e a variável secundária (atributo de melhor continuidade espacial). O conjunto de dados utilizados eram isotópicos (pontos de amostragem coincidentes). Os modelos foram ajustados segundo o método dos Mínimos Quadrados Ordinários e foi realizada a validação cruzada dos dados.

Os mapas gerados foram divididos em quatro classes, buscando-se adaptá-los as faixas de adequabilidade dos atributos do solo para as necessidades da cultura da bananeira segundo Borges et al. (2016) (Tabela 1).

Tabela 1. Faixas de adequabilidade dos atributos do solo para as necessidades da cultura da banana

Atributo do solo	Muito baixo	Baixo	Médio/Adequado	Alta
Cálcio, Ca (cmol _c kg ⁻¹)	<1,2	1,2-2,5	2,5-4,8	>4,8
Magnésio, Mg (cmol _c kg ⁻¹)	<0,3	0,3-0,6	0,6-1,2	>1,2
Potássio, K (cmol _c kg ⁻¹)	<0,16	0,16-0,31	0,31-0,60	>0,60
Fósforo, P Mehlich-1 (g kg ⁻¹)	<7,0	7,0-16,0	16,0-30,0	>30,0
Carbono orgânico total, COT (g kg ⁻¹)	<8,7	8,7-12,2	12,2-23,2	>23,2
Relação K/Mg	-	-	0,2-0,5	-
Relação Ca/Mg	-	-	3,0-4,0	-
CTC (pH 7,0; cmol _c kg ⁻¹)	<4,0	4,0-8,5	8,5-16,0	>16,0
V (%)	<35,0	35,0-60,0	60,0-80,0	>80,0

Fonte: Adaptado de Borges et al. (2016).

2.4 Geração das Zonas de Manejo por Meio da Análise Multivariada

Utilizando o software PAST 3.5 foi realizada análise multivariada para o delineamento das zonas de manejo (ZM). A seleção das variáveis para a geração das ZM foi realizada a partir do descrito por Molin et al. (2015), no qual os autores afirmam que as unidades homogêneas nas lavouras são constituídas por atributos do solo relacionados diretamente ao material de origem e formação do solo, como a granulometria, e fatores relacionados à matéria orgânica do solo.

Para isto, foi aplicada a análise de componentes principais (PCA) a partir da matriz de covariância, obtendo-se a contribuição de cada componente, os scores e os pesos das variáveis. Foi verificado os componentes de maior contribuição a partir dos autovetores (valores que representam o peso de cada atributo, em cada componente, e variam de -1 a +1) e observadas as variáveis de maiores contribuições e que influenciaram no delineamento das ZM.

Em seguida, estas variáveis foram submetidas à análise de agrupamento não hierárquico (análise de cluster), utilizando o método de particionamento não supervisionado k-médias (ANDERBERG, 1973). O número de zonas de manejo foi o número de agrupamentos formados (MOLIN et al., 2015). Foi avaliada a heterogeneidade dos resultados entre as zonas de manejo a partir de ANOVA e teste de comparação de médias de Tukey a 5% de significância ($p < 0,05$). Os mapas de zonas de manejo foram produzidos por meio do software ArcGis 10.5.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Variabilidade Espacial dos Atributos do Solo

A estatística descritiva e análise exploratória dos atributos do solo na área do bananal são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Estatística descritiva dos atributos do solo em cultivo da bananeira BRS Princesa (continua)

Variável	Min	Max	Média	DP	Mediana	Ass	Curt	CV(%)	Teste W
Camada de 0-0,05 m									
pH	5,71	7,37	6,48	0,37	6,44	0,38	-0,25	5,77	0,98 ^{ns}
Ca (cmol _c kg ⁻¹)	1,00	4,00	2,67	0,69	2,60	-0,01	-0,55	26,00	0,98 ^{ns}
Mg (cmol _c kg ⁻¹)	2,30	8,70	4,25	1,14	4,00	1,50	3,75	26,80	0,89*
H + Al (cmol _c kg ⁻¹)	0,78	3,48	1,61	0,47	1,53	1,23	3,23	28,91	0,92*
Na (cmol _c kg ⁻¹)	0,001	0,010	0,005	0,002	0,005	0,13	0,37	38,72	0,89*
K (cmol _c kg ⁻¹)	0,002	0,105	0,028	0,024	0,017	1,33	1,48	86,45	0,85*
P (g kg ⁻¹)	5,02	49,47	24,99	12,00	23,75	0,37	-0,69	48,01	0,96 ^{ns}
SB (cmol _c kg ⁻¹)	4,32	10,90	6,96	1,51	7,08	0,46	-0,01	21,66	0,97 ^{ns}
T (cmol _c kg ⁻¹)	6,14	12,72	8,56	1,46	8,59	0,45	0,25	17,01	0,97 ^{ns}
V (%)	63,72	92,32	80,74	6,06	80,96	-0,53	0,13	7,50	0,98 ^{ns}
COT (g kg ⁻¹)	8,68	32,04	15,99	4,20	15,92	0,94	2,35	26,28	0,95*
COam (g kg ⁻¹)	6,07	29,80	12,03	3,71	11,48	1,94	7,80	30,85	0,87*
COP (g kg ⁻¹)	0,86	10,20	3,96	2,17	3,33	0,85	0,13	54,76	0,93*
AT (g kg ⁻¹)	332,00	755,00	611,23	85,34	626,00	-1,03	1,16	13,96	0,93*
ArgT (g kg ⁻¹)	14,00	303,00	226,60	57,10	233,50	-1,54	3,14	25,20	0,88*
Silte (g kg ⁻¹)	26,00	405,00	156,35	86,79	130,50	1,26	0,90	55,51	0,87*
Camada de 0,05-0,10 m									
pH	5,32	6,60	5,92	0,27	5,90	0,32	0,57	4,52	0,97 ^{ns}
Ca (cmol _c kg ⁻¹)	1,20	3,80	2,06	0,54	2,00	1,01	1,56	26,47	0,98 ^{ns}
Mg (cmol _c kg ⁻¹)	2,90	8,10	4,50	1,03	4,40	1,18	2,09	23,00	0,92*
H + Al (cmol _c kg ⁻¹)	1,05	4,45	2,15	0,54	2,05	1,68	5,44	25,35	0,85*
Na (cmol _c kg ⁻¹)	0,001	0,008	0,002	0,001	0,002	2,83	8,93	54,04	0,64*
K (cmol _c kg ⁻¹)	0,003	0,025	0,008	0,005	0,007	1,25	1,75	55,10	0,90*
P (g kg ⁻¹)	5,27	36,75	13,94	7,29	11,79	1,69	2,47	52,31	0,81*
SB (cmol _c kg ⁻¹)	4,31	10,01	6,57	1,25	6,57	0,54	-0,11	19,09	0,97 ^{ns}
T (cmol _c kg ⁻¹)	6,56	12,66	8,72	1,31	8,47	1,02	1,45	15,02	0,94*
V (%)	60,00	87,60	75,05	6,01	75,30	-0,39	0,45	8,01	0,98 ^{ns}
COT (g kg ⁻¹)	7,89	17,63	11,42	2,46	10,68	0,82	-0,16	21,50	0,92*
COam (g kg ⁻¹)	4,96	15,64	10,01	2,08	9,74	0,39	0,36	20,78	0,98 ^{ns}
COp (g kg ⁻¹)	0,21	4,61	1,42	1,04	1,06	1,48	2,06	73,30	0,85*
AT (g kg ⁻¹)	263,00	712,00	589,85	99,69	604,50	-1,31	1,96	16,90	0,89*
ArgT (g kg ⁻¹)	83,00	401,00	264,25	55,38	264,00	-0,45	1,57	20,96	0,97 ^{ns}
Silte (g kg ⁻¹)	7,00	449,00	137,80	95,16	113,00	1,25	1,59	69,06	0,89*
Camada de 0,10-0,20 m									
pH	4,32	6,60	5,25	0,43	5,23	0,64	0,77	8,15	0,96 ^{ns}

Tabela 2. Continuação

Ca (cmol _c kg ⁻¹)	1,00	5,60	1,87	0,74	1,70	2,74	10,66	39,57	0,74*
Mg (cmol _c kg ⁻¹)	0,80	5,20	2,22	0,82	2,10	1,20	2,55	36,93	0,93*
Al (cmol _c kg ⁻¹)	0,000	0,400	0,072	0,099	0,000	1,46	1,61	138,57	0,73*
H + Al (cmol _c kg ⁻¹)	1,15	4,45	2,58	0,68	2,55	0,27	0,51	26,33	0,98 ^{ns}
Na (cmol _c kg ⁻¹)	0,001	0,005	0,002	0,001	0,002	2,11	5,24	43,20	0,78*
K (cmol _c kg ⁻¹)	0,002	0,024	0,006	0,004	0,005	2,60	9,27	65,91	0,76*
P (g kg ⁻¹)	6,53	45,83	15,50	9,29	11,71	1,67	2,42	59,96	0,80*
SB (cmol _c kg ⁻¹)	2,50	10,83	4,10	1,34	3,86	2,58	10,31	32,77	0,78*
T (cmol _c kg ⁻¹)	4,76	12,68	6,68	1,33	6,56	1,74	5,78	19,93	0,88*
V (%)	37,10	85,40	60,71	9,55	59,45	0,66	0,97	15,73	0,95*
COT (g kg ⁻¹)	5,88	25,66	10,08	2,92	9,55	2,78	12,85	28,95	0,78*
COam (g kg ⁻¹)	1,69	23,37	6,78	3,19	6,61	2,50	11,54	47,03	0,82*
COp (g kg ⁻¹)	1,01	9,60	3,31	1,70	3,07	1,88	4,51	51,46	0,83*
AT (g kg ⁻¹)	196,00	736,00	544,55	127,91	575,50	-1,11	1,01	23,49	0,91*
ArgT (g kg ⁻¹)	83,00	395,00	236,40	54,12	232,50	0,18	1,48	22,89	0,97 ^{ns}
Silte (g kg ⁻¹)	56,00	588,00	212,58	125,89	179,50	1,46	1,80	59,22	0,85*
Camada de 0,20-0,40 m									
pH	4,32	6,60	5,25	0,43	5,23	0,64	0,77	8,15	0,96 ^{ns}
Ca (cmol _c kg ⁻¹)	1,00	3,70	1,84	0,60	1,70	1,53	2,62	32,76	0,85*
Mg (cmol _c kg ⁻¹)	0,80	5,20	2,22	0,82	2,10	1,20	2,55	36,93	0,93*
Al (cmol _c kg ⁻¹)	0,000	0,400	0,072	0,099	0,000	1,46	1,61	138,57	0,73*
H + Al (cmol _c kg ⁻¹)	1,15	4,45	2,58	0,68	2,55	0,27	0,51	26,33	0,98 ^{ns}
Na (cmol _c kg ⁻¹)	0,001	0,005	0,002	0,001	0,002	2,12	5,29	43,77	0,78*
K (cmol _c kg ⁻¹)	0,002	0,024	0,006	0,004	0,005	2,60	9,23	65,90	0,76*
P (g kg ⁻¹)	6,53	45,83	15,50	9,29	11,71	1,67	2,42	59,95	0,80*
SB (cmol _c kg ⁻¹)	2,50	10,83	4,10	1,34	3,86	2,59	10,31	32,76	0,78*
T (cmol _c kg ⁻¹)	4,76	12,68	6,68	1,33	6,56	1,74	5,78	19,92	0,88*
V (%)	37,07	85,41	60,70	9,54	59,49	0,66	0,97	15,72	0,95*
COT (g kg ⁻¹)	5,88	15,24	9,83	2,09	9,55	0,69	0,14	21,21	0,96*
AT (g kg ⁻¹)	196,00	736,00	544,55	127,91	575,50	-1,11	1,01	23,49	0,91*
ArgT (g kg ⁻¹)	83,00	395,00	236,40	54,12	232,50	0,18	1,48	22,89	0,97 ^{ns}
Silte (g kg ⁻¹)	56,00	588,00	212,58	125,89	179,50	1,46	1,80	59,22	0,85*

Mín: Mínimo; Max: Máximo; DP: Desvio padrão; Ass: Assimetria; Curt: Curtose; CV (%): Coeficiente de variação; Teste W: Teste de normalidade de Shapiro-Wilk, *significativo a 5% ($p < 0,05$); ns: não significativo no teste de normalidade de Shapiro-Wilk a 5%; AT: Areia total; ArgT: Argila total.

A normalidade dos dados foi verificada através do teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância ($p < 0,05$), em que foram observados que cerca de 70% das variáveis foram significativas. As variáveis não significativas podem ser respaldadas pelos valores de assimetria e curtose próximos de zero, que também são um indicativo de tendência à normalidade dos dados. A verificação da normalidade dos dados é um procedimento que antecede ao estudo geoestatístico, uma vez que podem ser verificados dados que podem não contribuir na modelagem dos semivariograma e na estimativa dos espaços não amostrados quando realizada a krigagem ordinária.

Na camada de 0-0,05 m todos os atributos do solo apresentaram CV classificados como médios ($12 < CV < 60\%$) segundo Warrick e Nielsen (1980), exceto a variável potássio (K) que

apresentou alto coeficiente de variação e o pH e valor V% que apresentaram CV classificados como baixos. Todas as variáveis na camada de 0,05-0,10 m apresentaram coeficiente de variação classificados como médios, exceto o silte e o COp (alto CV) e o pH e valor V% (baixo CV). Nas camadas seguintes, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, apenas os valores de pH foram classificados como de baixo CV e os valores de potássio (K) e alumínio (Al) apresentaram altos CV, enquanto as demais variáveis apresentaram CV médios.

A baixa variação dos valores de pH em campo tem sido observada em diversos estudos, para diferentes tipos de solos, culturas e climas (ZUCOLOTO et al., 2011a; FREDDI et al., 2017; MOHARANA et al., 2020). A alta variação dos teores de Al^{+3} nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m foi ocasionada pelo fato de poucas regiões do bananal apresentarem teores significativos que pudessem ser quantificados em laboratório, apresentando valores iguais a zero nas camadas superficiais. As frações granulométricas em todas as profundidades apresentaram altos valores de desvio padrão, indicando alta variância dos dados na da área experimental.

Os parâmetros variográficos obtidos na modelagem dos semivariograma teóricos para cada atributo do solo nas diferentes profundidades da área experimental são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros variográficos dos atributos do solo em cultivo da banana BRS Princesa (continua)

Variável	Método	Modelo	C ₀	C	C ₀ +C	A (m)	GDE (%)	\overline{ER}	S _{ER}	AIC
Camada 0-0,05 m										
pH	MV	Esf	0,003	0,131	0,134	13,2	Forte	0,0063	1,0832	41,5
Ca (cmol _c kg ⁻¹)	MV	Esf	0,085	0,395	0,480	10,8	Forte	-0,0014	1,0852	128,6
Mg (cmol _c kg ⁻¹)	MV	Esf	0,529	0,747	1,276	8,5	Moderado	0,0099	1,1027	192,0
H + Al (cmol _c kg ⁻¹)	MQO	Esf	0,000	0,247	0,247	10,4	Forte	0,0111	1,4339	-
Na (cmol _c kg ⁻¹)	EPP	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K (cmol _c kg ⁻¹)	MQO	Esf	0,000	0,001	0,001	25,0	Forte	0,0109	1,0590	-
P (g kg ⁻¹)	MV	Esf	0,000	140,430	140,430	9,1	Forte	-0,0022	1,0271	471,0
SB (cmol _c kg ⁻¹)	MV	Esf	0,823	1,364	2,187	10,7	Moderado	0,0047	1,0690	222,1
T (cmol _c kg ⁻¹)	MQO	Esf	0,000	2,182	2,182	9,6	Forte	-0,0052	1,1023	-
V (%)	MV	Esf	17,660	17,650	35,310	14,0	Moderado	-0,0055	1,1172	387,5
COT (g kg ⁻¹)	MQO	Esf	0,000	19,306	19,306	9,9	Forte	-0,0001	1,2606	-
COam (g kg ⁻¹)	MQO	Esf	0,000	14,661	14,661	9,9	Forte	-0,0052	-1,3209	-
COp (g kg ⁻¹)	COK	Esf	0,253	0,779	1,032	15,0	Forte	-	-	-
AT (g kg ⁻¹)	MQO	Esf	2718,247	4404,132	7122,379	14,6	Moderado	0,0095	1,1236	-
ArgT (g kg ⁻¹)	MQO	Gau	2057,302	2635,463	4692,765	30,2	Moderado	-0,0157	1,2098	-
Silte (g kg ⁻¹)	EPP	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Camada 0,05-0,10 m										
pH	MQO	Exp	0,032	0,048	0,079	10,0	Moderado	0,0091	1,0901	-
Ca (cmol _c kg ⁻¹)	MQO	Esf	0,261	0,243	0,504	10,9	Moderado	0,0081	0,9908	-
Mg (cmol _c kg ⁻¹)	MV	Esf	0,000	0,998	0,998	11,0	Forte	0,0155	1,0155	168,6
H + Al (cmol _c kg ⁻¹)	MV	Esf	0,137	0,156	0,293	10,1	Moderado	0,0298	1,1625	102,9
Na (cmol _c kg ⁻¹)	EPP	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K (cmol _c kg ⁻¹)	EPP	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P (g kg ⁻¹)	MQO	Esf	0,000	50,205	50,205	10,4	Forte	-0,0119	1,3263	-

Tabela 3. Continuação

SB (cmol _c kg ⁻¹)	MV	Esf	0,000	1,452	1,452	11,2	Forte	0,0106	1,0060	190,6
T (cmol _c kg ⁻¹)	MV	Esf	0,000	1,619	1,619	12,4	Forte	0,0138	1,0100	192,9
V (%)	MV	Esf	12,325	22,888	35,213	9,6	Moderado	-0,0033	1,0753	389,8
COT (g kg ⁻¹)	MQO	Esf	2,216	4,347	6,563	24,8	Moderado	0,0199	1,2073	-
COam (g kg ⁻¹)	MQO	Esf	2,525	2,261	4,786	27,8	Moderado	0,0083	1,0834	-
COp (g kg ⁻¹)	COK	Esf	0,046	0,295	0,340	20,0	Forte	-	-	-
AT (g kg ⁻¹)	MV	Esf	3868,730	5707,580	9576,310	10,1	Moderado	0,0001	1,1028	726,1
ArgT (g kg ⁻¹)	MV	Gau	807,830	2258,860	3066,690	8,1	Moderado	-0,0102	1,0787	638,5
Silte (g kg ⁻¹)	EPP	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Camada 0,10-0,20 m										
pH	MV	Esf	0,0229	0,1519	0,1748	12,5	Forte	0,0150	1,140097	63,0
Ca (cmol _c kg ⁻¹)	MQO	Gau	0,2661	0,3917	0,6578	10,9	Moderado	0,0087	1,504366	-
Mg (cmol _c kg ⁻¹)	MQO	Exp	0	0,8526	0,8526	13,3	Forte	0,0329	1,378468	-
H + Al (cmol _c kg ⁻¹)	MV	Esf	0	0,444	0,4440	11,8	Forte	-0,0111	0,9789	117,3
Na (cmol _c kg ⁻¹)	EPP	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K (cmol _c kg ⁻¹)	EPP	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P (g kg ⁻¹)	MV	Esf	8,864	80,289	89,153	11,4	Forte	0,0203	1,1357	439,4
SB (cmol _c kg ⁻¹)	MQO	Gau	0,458	1,742	2,201	10,8	Forte	0,0254	1,7698	-
T (cmol _c kg ⁻¹)	MV	Esf	0,510	1,193	1,703	15,2	Moderado	0,0302	1,3932	199,3
V (%)	MV	Esf	53,170	39,880	93,050	27,3	Moderado	0,0135	1,0728	440,2
COT (g kg ⁻¹)	MQO	Esf	2,843	2,126	4,968	16,1	Moderado	0,0010	1,0910	-
COam (g kg ⁻¹)	MV	Esf	1,681	4,448	6,129	9,7	Moderado	0,0001	1,0653	284,4
COp (g kg ⁻¹)	MV	Gau	1,306	1,788	3,094	6,8	Moderado	0,0280	1,1497	237,8
AT (g kg ⁻¹)	MV	Esf	0,000	15979,355	15979,355	8,3	Forte	-0,0118	1,0678	756,7
ArgT (g kg ⁻¹)	MV	Gau	1473,070	1451,850	2924,920	14,3	Moderado	0,0022	1,0611	637,8
Silte (g kg ⁻¹)	MQO	Esf	0,000	16721,925	16721,925	8,7	Forte	0,0032	1,0621	-
Camada 0,20-0,40 m										
pH	MV	Esf	0,023	0,152	0,175	12,5	Forte	0,0150	1,1400	63,0
Ca (cmol _c kg ⁻¹)	MV	Esf	0,206	0,172	0,377	30,0	Moderado	0,0272	1,1183	107,5
Mg (cmol _c kg ⁻¹)	MQO	Exp	0,000	0,853	0,853	13,3	Forte	0,0329	1,3783	-
H + Al (cmol _c kg ⁻¹)	MV	Gau	0,000	0,506	0,506	6,1	Forte	-0,0172	1,0388	116,0
Na (cmol _c kg ⁻¹)	MQO	Esf	0,000	0,000	0,000	19,0	Forte	0,0006	1,1507	-
K (cmol _c kg ⁻¹)	MQO	Exp	0,000	0,000	0,000	9,0	Forte	0,0779	1,6236	-
P (g kg ⁻¹)	MV	Esf	8,896	80,245	89,141	11,4	Forte	0,0203	1,1357	439,4
SB (cmol _c kg ⁻¹)	MQO	Exp	0,000	2,325	2,325	9,0	Forte	0,0274	1,2402	-
T (cmol _c kg ⁻¹)	MV	Esf	0,511	1,191	1,703	15,2	Moderado	0,0301	1,3925	199,3
V (%)	MV	Esf	53,200	39,720	92,920	27,3	Moderado	0,0135	1,0726	440,1
COT (g kg ⁻¹)	MV	Gau	3,085	1,471	4,556	12,7	Moderado	0,0042	1,0820	261,2
AT (g kg ⁻¹)	MV	Esf	0,000	15979,296	15979,296	8,3	Forte	-0,0118	1,0678	756,7
ArgT (g kg ⁻¹)	MV	Gau	1472,850	1451,890	2924,740	14,3	Moderado	0,0022	1,0610	637,8
Silte (g kg ⁻¹)	MQO	Esf	0,000	16825,985	16825,985	8,9	Forte	0,0027	1,0609	-

Modelo: Esf – esférico, Exp – exponencial, Gau – gaussiano; C₀: Efeito pepita; C: Contribuição; C₀+C: Patamar; A: Alcance (m); GDE: Grau de dependência espacial; \overline{ER} : Erro médio reduzido; S_{ER} : Desvio padrão do erro médio reduzido; AIC: Critério de informação de Akaike; AT: Areia total; ArgT: Argila total; MV: Máxima Verossimilhança; MQO: Mínimos quadrados Ordinários; EPP: Efeito pepita puro; COK: Cokrigagem ordinária

com modelo ajustado pelo método dos Mínimos Quadrados Ordinários. Variáveis utilizadas no semivariograma cruzado: COp (variável primária) e Ca (variável secundária) da camada 0-0,05 m, COp (variável primária) e Ca (variável secundária) da camada 0,05-0,10 m.

Os atributos sódio (Na^+) (em 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m), potássio (K^+) (em 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m) e silte (em 0-0,05 e 0,05-0,10 m) apresentaram efeito pepita puro (EPP), não sendo possível realizar a modelagem de seus semivariogramas experimentais e inferir espacialmente os locais não amostrados. Este fenômeno indica ausência de dependência espacial, podendo ser decorrente de erros experimentais e de modelagem não previstos. Resultados similares para o atributo silte foram verificados em Zucoloto et al. (2011b), em que foi observado EPP para este atributo ao avaliar a variabilidade espacial das frações granulométricas de Argissolo Amarelo em cultivo de banana no norte do Espírito Santo.

Os semivariogramas dos atributos do solo foram modelados, ajustados e escolhidos para que melhor pudessem estimar e representar seus valores próximos da realidade em campo. Desta maneira, a escolha pelo método da Máxima Verossimilhança (MV) ou Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) visaram apenas adequar os melhores modelos ajustados para cada atributo estudado, sendo respaldados pelos parâmetros obtidos na validação cruzada dos dados (erro médio absoluto, desvio padrão do erro médio absoluto e critério de informação de Akaike).

O modelo esférico ajustou-se intimamente aos semivariogramas experimentais calculados para todos os atributos do solo que apresentaram dependência espacial em 0-0,05 m, exceto para a ArgT em que verificou-se o modelo gaussiano como o melhor modelo ajustado. Em 0,05-0,10 m os modelos ajustados foram os esféricos, seguidos do gaussiano e exponencial. Na profundidade de 0,10-0,20 m, os modelos de semivariograma predominantes foram os esféricos, seguido do exponencial e gaussiano. O modelo esférico proporcionou melhores reproduções da forma dos semivariogramas experimentais calculados para grande parte dos dados constituídos na profundidade de 0,20-0,40 m, sendo seguidos dos modelos exponenciais e gaussianos.

Todas as modelagens foram verificadas quanto ao grau de dependência espacial (GDE) entre as amostras e é interessante notar que cerca de 40% dos atributos apresentaram GDE moderados segundo a classificação de Cambardella et al. (1994). Este padrão pode estar relacionado à fatores extrínsecos do solo, como o manejo e adubação (CAMBARDELLA et al., 1994). A forte dependência espacial foi verificada para cerca de 47% dos atributos avaliados, podendo estar ligada à fatores intrínsecos do solo.

A verificação de dependência espacial é significativa no que diz respeito à não aleatoriedade das amostras em campo e observação de correlação espacial, indicando a existência de covariância e similaridade entre as amostras até determinada distância, representado pelos valores de alcance (YAMAMOTO & LANDIM, 2013). Como pode ser observado na Tabela 3, estes valores de alcance variaram de 8,5 m para o magnésio (Mg^{+2}) a 30,2 m para a variável argila total (ArgT) em 0-0,05 m, 8,1 m para a ArgT e 27,8 para o COam em 0,05-0,10 m. Assim como foram verificados padrões espaciais a partir de intervalos de correlação de 6,8 m COp e 27,3 m para V% em 0,10-0,20 m e 6,1 m para H + Al e 30,0 m para o Ca^{+2} em 0,20-0,40 m, sendo estes valores totalmente relacionados à semivariância pela distância na modelagem variográfica.

Os resultados sugerem que o intervalo de amostragem representativo deve apresentar os menores alcances determinados pelos atributos do solo nas diferentes profundidades. A variabilidade espacial e os curtos alcances verificados para algumas variáveis podem ter influências do manejo realizado na área do bananal, assim como podem estar relacionados ao tipo de solo formado na região (solo formado por sedimentos previamente intemperizados).

A distribuição espacial dos atributos do solo em diferentes classes na área de cultivo da banana BRS Princesa pode ser observada nas Figuras 2, 3, 4 e 5.

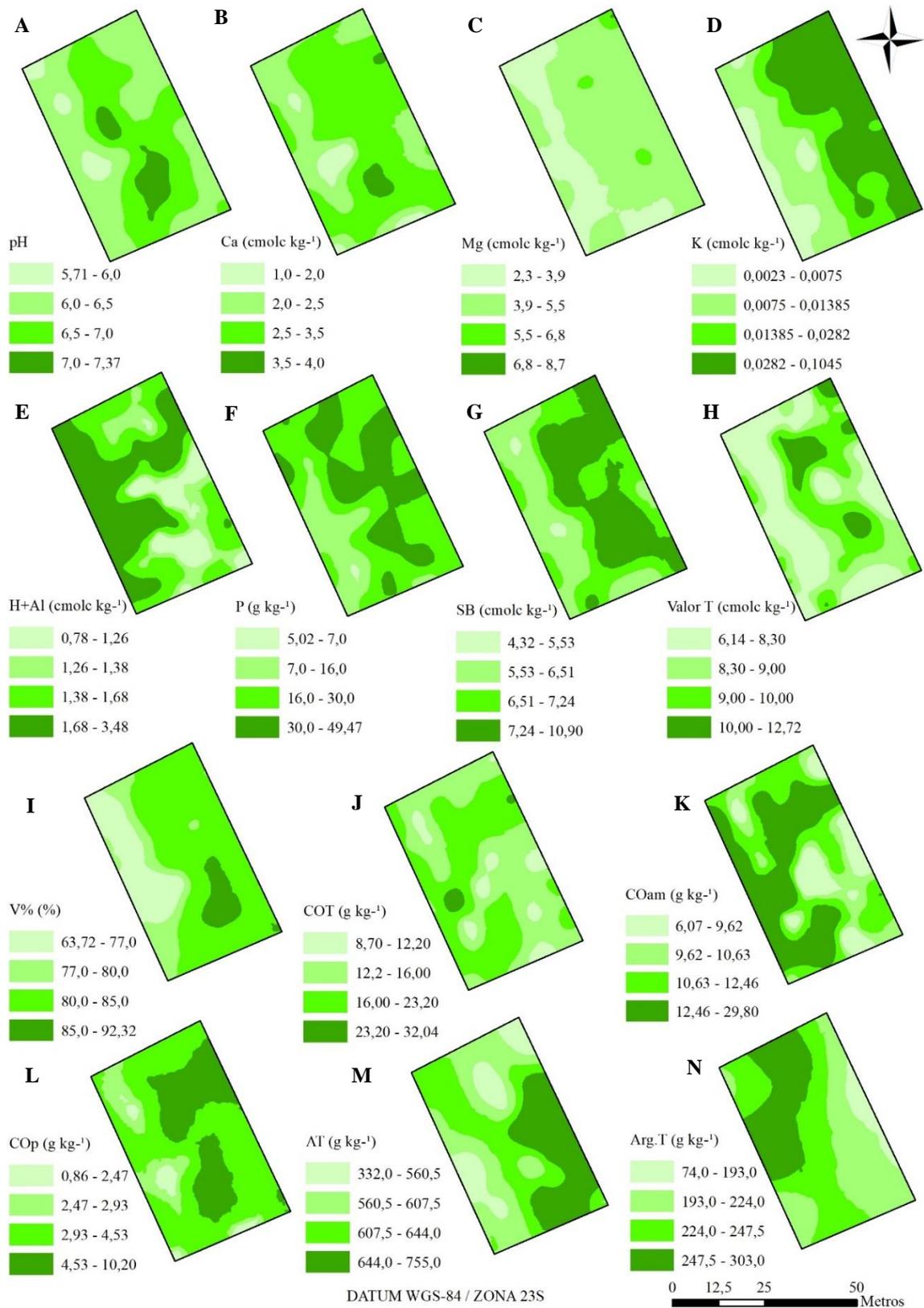


Figura 2. Mapas de variabilidade espacial dos atributos do solo em área de cultivo da banana BRS Princesa em 0-0,05 m.

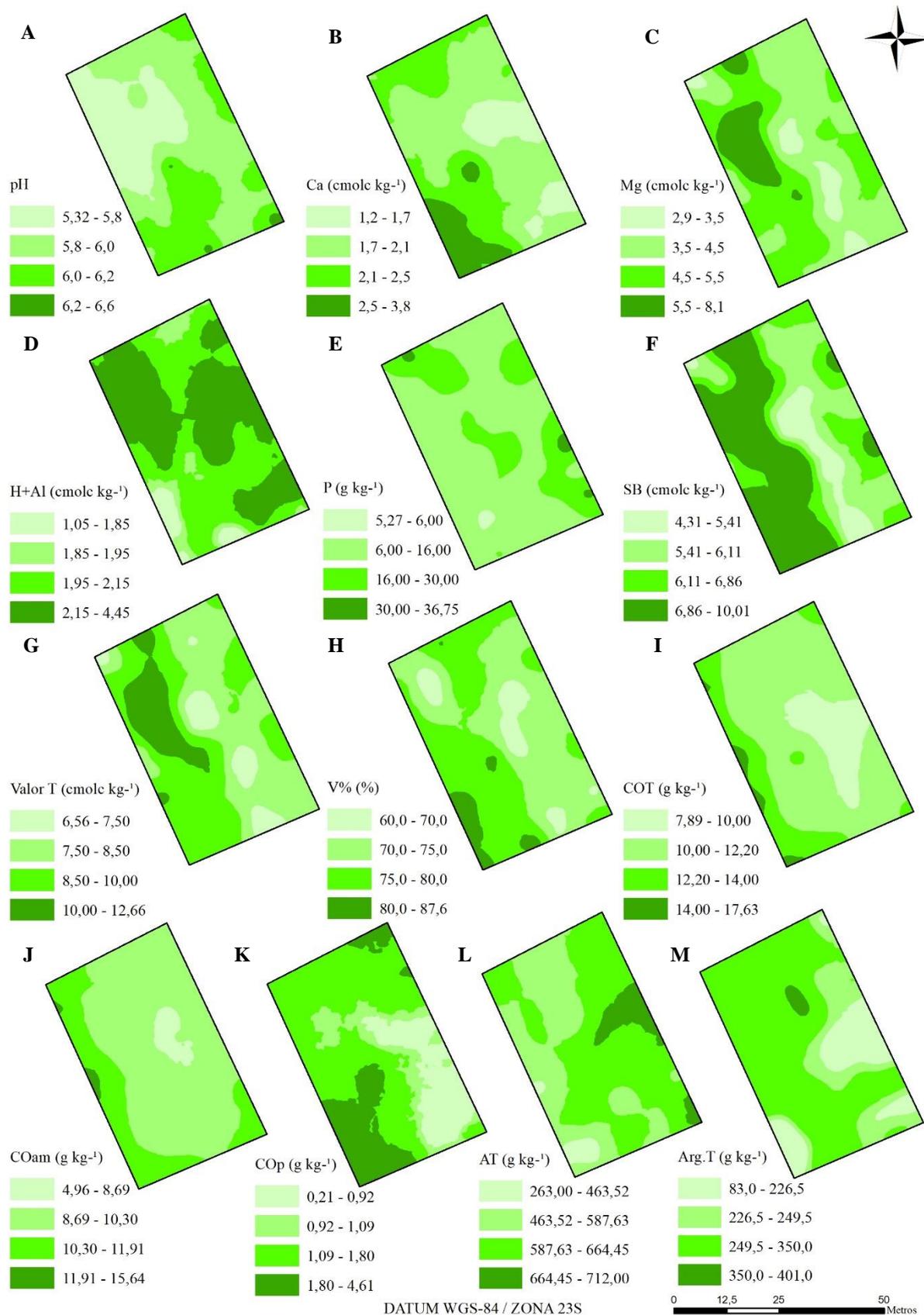


Figura 3. Mapas de variabilidade espacial dos atributos do solo em área de cultivo da banana BRS Princesa em 0,05-0,10 m.

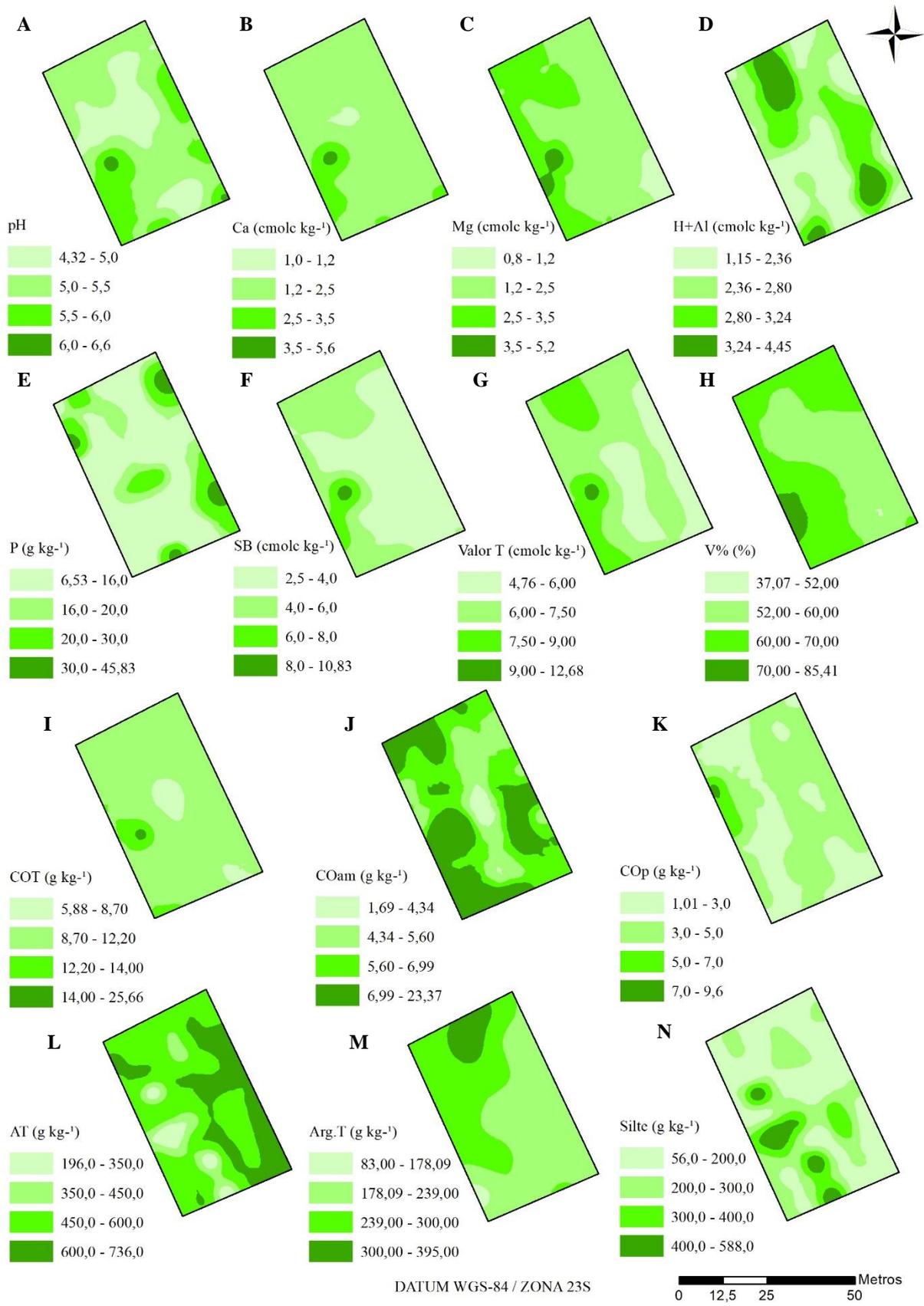


Figura 4. Mapas de variabilidade espacial dos atributos do solo em área de cultivo da banana BRS Princesa em 0,10-0,20 m.

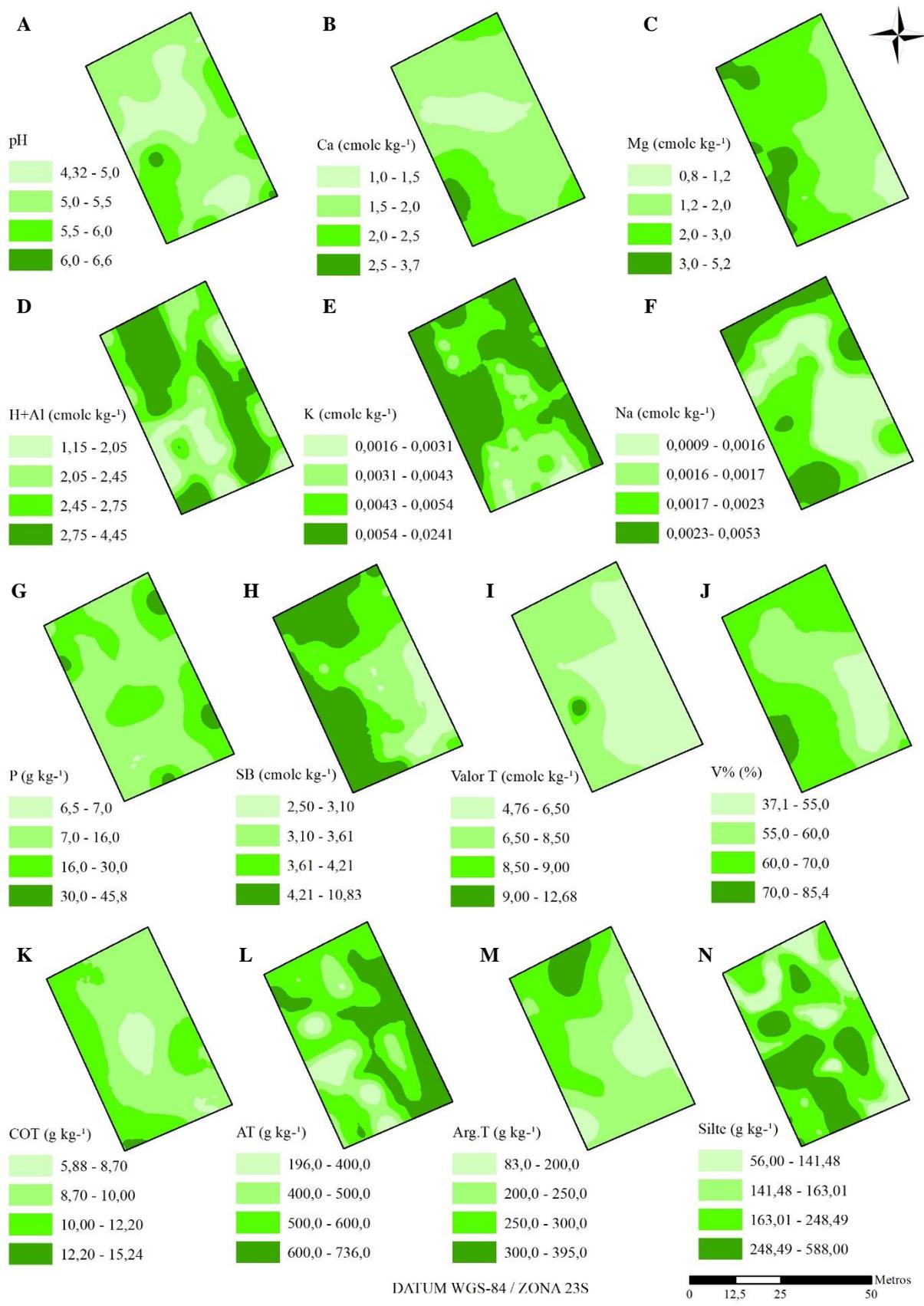


Figura 5. Mapas de variabilidade espacial dos atributos do solo em área de cultivo da banana BRS Princesa em 0,20-0,40 m.

Na camada 0-0,05 m nas regiões sudeste e noroeste foram verificados valores de pH acima de 7,0 (Figura 2A), considerados não adequados para o cultivo da bananeira. Menezes e Galvão (2004) sugerem os valores de pH entre 4,5 a 7,0 como os adequados para o desenvolvimento da bananeira. Valores de pH abaixo de 4,5 foram observados nas camadas mais subsuperficiais, em 0,05-0,10 m nas regiões oeste e noroeste verificaram-se valores de pH de 4,3 (Tabela 2 e Figura 3A). Este mesmo padrão foi observado na camada de 0,10-0,20 m (Figura 4A) e em 0,20-0,40 m (Figura 5A), entretanto nas regiões sudeste, oeste e na direção norte. Lima et al. (2012) indicam que a bananeira se desenvolve melhor em solos com pH entre 5,5 e 6,5. Se considerada esta faixa de acidez, grande parte das regiões do bananal em 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m devem ser corrigidas a partir da aplicação de calcário.

É nítido o aumento da acidez em profundidade, indicando a maior eficiência do calcário apenas nas regiões indicadas como de baixa acidez, promovendo melhoria nas condições químicas destas regiões e adicionalmente fornecendo cálcio e magnésio para a cultura. A presença de alumínio (Al^{+3}) em subsuperfície indicada pelos seus valores médios ($0,072 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) e máximos ($0,4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) (Tabela 2) corroboram com as interpretações realizadas.

Observou-se que os teores de cálcio (Ca^{+2}) na área do bananal diminuem em subsuperfície, sendo observados teores muito baixos a baixos segundo a classificação de Borges et al. (2016), verificando-se apenas pequenas manchas na região sul com teores adequados, acima de $2,5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Figuras 3B, 4B e 5B). Em contrapartida, os teores de magnésio (Mg^{+2}) em todas as camadas de solo apresentaram-se acima do nível adequado para o cultivo da bananeira. Observaram-se teores máximos de magnésio de $8,7 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ em 0-0,05 e 0,05-0,10 m e $5,2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ nas camadas 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m (Tabela 2), valores muito acima da faixa de adequabilidade para o cultivo da bananeira. Estes altos teores de Mg^{+2} na solução do solo podem ser os responsáveis pela indução da redução de Ca^{+2} e K^+ (BORGES, 2004).

Esta afirmativa é respaldada através das análises das relações de Ca/Mg e K/Mg, em que em todos os pontos do bananal foram verificados valores muito abaixo da faixa de adequabilidade, indicando haver desbalanço nutricional, sendo os valores médios para a relação Ca/Mg de 0,65, 0,47, 0,93 e 0,83 para as profundidades 0-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente, e a relação K/Mg de 0,006, 0,002, 0,002 e 0,003 para as profundidades 0-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente.

Estas relações sugerem que existe a necessidade do aumento dos teores de Ca e K no bananal, sendo de extrema importância ao equilíbrio na solução do solo, pois o desequilíbrio de nutrientes pode promover deficiências nutricionais à bananeira e afetar o crescimento e a produtividade (FREITAS et al., 2015), afetando a saúde da planta e contribuir no desenvolvimento de doenças (LIMA et al., 2012; FREITAS et al., 2015).

Os teores de potássio (K^+) apresentaram-se em todas as profundidades estudadas abaixo da faixa de adequabilidade para o cultivo da bananeira. Os maiores teores foram observados ao longo das regiões norte, leste e sudeste na camada de 0-0,05 m, entretanto esses valores foram bem abaixo dos considerados adequados. O potássio é um dos principais nutrientes necessários ao desenvolvimento da bananeira, pois juntamente a outros como o nitrogênio (N) é o responsável pela produção de fitomassa, afetando o número de cachos, crescimento dos frutos e o desenvolvimento das raízes (NOMURA et al., 2016). Além disto, os teores adequados de K são responsáveis para a saúde da bananeira, como verificados por Uchôa et al. (2011). Os referidos autores verificaram através de mapeamentos da doença Sigatoka Negra (*Mycosphaerella fijiensis* Morelet) realizados partir de modelagem geoestatística que a gravidade reduzida da doença ocorreu nas regiões com altos teores de K no solo.

Assim como outras cultivares, a bananeira BRS Princesa é exigente quanto a nutrição do solo. Nomura et al. (2016) avaliaram doses de adubação nitrogenada e potássica para a bananeira da variedade 'BRS Princesa' no Vale do Ribeira no estado de São Paulo e

constatarem que a cultivar necessita de maiores quantidades de adubação para expressarem seu potencial produtivo, representando cerca de 150% da recomendação padrão para a bananeira. Desta maneira, entende-se que a deficiência de K^+ pode ser um dos principais limitantes no crescimento e desenvolvimento atual do bananal.

Em relação aos teores de fósforo (P), em todas as regiões da camada de 0-0,05 m foram verificados valores adequados deste nutriente, exceto as regiões sul e sudoeste. Nas camadas seguintes, pequenas manchas em todas as direções do bananal apresentaram-se com teores ideais de P, exceto na região sul. A região em estudo é caracterizada por apresentar naturalmente solos com baixo conteúdo de P e aliado a isto, este nutriente é facilmente adsorvido pelos elevados teores de óxidos de ferro e alumínio presente nos Argissolos (SANTOS et al., 2018).

Desta maneira, o manejo de adubação orgânica possivelmente é o responsável pela manutenção e presença de faixas adequadas de P em determinadas regiões da área experimental e, se realizada adubação fosfatada, apenas pequenas subunidades nos bananais precisarão ser adubadas. Os teores adequados de P no solo em bananais devem ser mantidos devido a sua contribuição na formação das raízes e por evitar o amarelecimento e retorcimento das folhas mais velhas, a produção de pequenos cachos e irregularidades na maturação (SILVA et al., 2011; FREITAS et al., 2015).

Quanto à capacidade de troca catiônica total (Valor T), na camada superficial observaram-se valores mínimos em torno de $6,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ e valores máximos em torno de $12,5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Tabela 2 e Figuras 2H e 3G). Enquanto nas camadas subsuperficiais (0,10-0,20 e 0,20-0,40 m) estes valores foram em torno de 4,76 e $12,68 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ para os valores mínimos e máximos, respectivamente (Figuras 2G e 3I). Estes valores tiveram uma grande contribuição dos valores de $H + Al$ (sobretudo H^+), visto os baixos valores da soma de bases (SB). Em todas as camadas do solo os valores T foram abaixo da faixa de adequabilidade para a bananeira, indicando que o solo possui uma baixa capacidade para reter cátions. Neste caso, as adubações e calagens devem ser feitas de maneira parcelada para evitar perdas por lixiviação (RONQUIM, 2010).

Segundo Ronquim (2010) o critério mais seguro para indicar a correção do solo a partir de calagem é avaliar o valor de saturação por bases (V%), buscando adequar o valor de V% às exigências nutricionais da cultura. A partir do exposto, é possível inferir que as camadas 0-0,05 e 0,05-0,10 m não necessitam de calagem, pois foram observados valores na faixa ideal de adequabilidade para o desenvolvimento da bananeira (V% acima de 60%). Para as camadas 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m observou-se que as regiões noroeste, leste e sudeste apresentaram valores de V% abaixo dos indicados para o cultivo da bananeira, devendo ser realizada calagem localizada apenas nestas subunidades.

O manejo do bananal a partir de diferentes densidades de plantas por hectare pode explicar a variação espacial dos atributos químicos, uma vez que as bananeiras mais adensadas competem por mais nutrientes ao mesmo tempo que contribuem com aporte de biomassa a partir de suas raízes e folhas.

Na camada de 0-0,05 m foram verificados teores de COT que variaram de 8,7 a $32,04 \text{ g kg}^{-1}$ (Tabela 2 e Figura 2J), sendo a única camada de solo com uma pequena extensão de regiões em faixas adequadas para o cultivo da bananeira. Esta camada foi diretamente impactada em função do manejo do bananal a partir da aplicação de adubação orgânica e incorporação de resíduos culturais. Essas práticas contribuem para o aumento dos teores de COT em comparação com as camadas subsuperficiais, pois promove o aumento da fitomassa que pode ser utilizada como cobertura morta, favorecendo dessa maneira o aumento dos teores de COT (RIBEIRO et al., 2013).

Este padrão foi observado em outros estudos, como o de Rosado et al. (2012), que ao avaliarem os atributos físicos e da MOS em Latossolo Amarelo cultivado com banana com e sem cobertura vegetal (grama nativa) observaram maiores valores de COT em superfície (0,0-

0,05 m) quando comparados aos valores de subsuperfície (0,05-0,20 m) e ainda, maiores valores de MO nos solos com cobertura do que os sem cobertura.

Os teores de carbono orgânico na camada de 0-0,05 m foram os principais responsáveis pela adequabilidade dos atributos químicos da camada superficial. Os solos da área de estudo foram formados por um intenso processo de intemperismo, apresentando naturalmente baixa fertilidade natural, elevada acidez e baixos teores de matéria orgânica. Desta maneira, o manejo realizado no bananal como a adubação orgânica e a incorporação de resíduos vegetais das bananeiras a partir do desbaste e desfolha foram os responsáveis pela entrada e manutenção dos teores de matéria orgânica na camada superficial. Esse padrão demonstra o importante papel que a matéria orgânica possui na conservação e manutenção dos solos, uma vez que é responsável por armazenar boa parte dos nutrientes do solo (FREIRE et al., 2013).

Estudos como o de Villarreal-Núñez et al. (2013) confirmam esta afirmativa. Os autores a partir da investigação de um índice de gestão agrícola e ambiental em solos cultivados com banana no Panamá constataram que a matéria orgânica é um dos indicadores mais sensíveis na gestão do solo em áreas de bananeiras, influenciando diretamente em outros atributos do solo. Este padrão também foi observado por Cantú et al. (2007) em áreas produtoras de banana da Argentina.

Esse padrão também foi observado ao avaliar os valores de carbono orgânico particulado (CO_p) e o carbono orgânico associado aos minerais (CO_{am}) em 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m obtidos através do fracionamento físico da MOS. O CO_p é a fração da MOS considerada a mais lábil e sensível ao manejo, podendo ser usado como um bom indicador de qualidade do solo (ROSSI et al., 2015). Na área experimental observou-se que houve uma mudança brusca dos seus teores e localização no solo quando comparadas a camada superficial e subsuperficial, indicando respostas positivas quanto ao manejo com adubação orgânica realizado no bananal.

Observou-se que em todas as camadas de solo, as maiores frações de argila total concentraram-se nas regiões norte, oeste e noroeste (Figuras 2N, 3M, 4M e 5M) enquanto as maiores frações de areia total concentraram-se nas regiões leste, nordeste e sudeste (Figuras 2M, 3L, 4L e 5L), possuindo regiões bem delimitadas e definidas. A verificação da distribuição espacial das frações granulométricas mostrou-se totalmente significativa quando refletido sobre os manejos relacionadas à fertilidade do solo (absorção de nutrientes e interações organo-minerais), retenção de água e condições físicas favoráveis ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas (ZUCOLOTO et al., 2011b).

3.2 Zonas de Manejo (ZM)

Adotou-se o método descrito por Molin et al. (2015) para a seleção das variáveis na geração das zonas de manejo (ZM), no qual os autores afirmam que as unidades homogêneas nas lavouras são constituídas por atributos do solo relacionados diretamente ao material de origem e formação do solo, como a granulometria, e fatores relacionados à matéria orgânica do solo. Desta maneira, os atributos do solo saturação por bases (V%), argila total, areia total, carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (CO_p) e carbono orgânico associado aos minerais (CO_{am}) foram os selecionados ao estudo multivariado.

Na Tabela 4 são apresentados os componentes principais e seus percentuais de variação explicada para as variáveis definidas no delineamento das ZM obtidos a partir da análise por componentes principais (PCA).

Tabela 4. Percentual da variação total explicada por cada componente principal para as variáveis selecionadas na geração de ZM

PC	Camada 0-0,05 m			Camada 0,05-0,10 m			Camada 0,10-0,20 m			Camada 0,20-0,40 m		
	Autovalor	% E	% EA	Autovalor	% E	% EA	Autovalor	% E	% EA	Autovalor	% E	% EA
1	2,03	33,79	33,79	2,74	45,68	45,68	2,30	38,41	38,41	1,49	37,15	37,15
2	1,52	25,39	59,18	1,12	18,71	64,39	1,32	22,02	60,44	1,01	25,18	62,33
3	1,09	18,10	77,28	0,92	15,40	79,79	1,07	17,85	78,29	0,83	20,85	83,17
4	0,75	12,47	89,75	0,73	12,24	92,03	0,69	11,56	89,85	0,67	16,83	100,00
5	0,62	10,25	100,00	0,48	7,98	100,00	0,61	10,15	100,00	-	-	-
6	7,9E-20	1,3E-18	100,00	7,6E-20	1,3E-18	100,00	5,6E-20	9,3E-19	100,00	-	-	-

CP = Componente principal; % E = Variação explicada; % EA = Variação explicada acumulada.

Foi possível verificar que em todas as camadas estudadas os componentes 1, 2 e 3 (PC 1, 2 e 3) explicaram a variação existente nos dados, apresentando alta porcentagem de explicação (acima de 70%). Na Tabela 5 são apresentados os pesos (coeficientes) de cada variável em relação a cada componente nas diferentes profundidades.

Tabela 5. Pesos (coeficientes) das variáveis nos componentes principais para as variáveis selecionadas na geração de ZM (Continua)

Variável original	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5	PC 6
Camada 0-0,05 m						
V%	0,0179	0,5829	-0,2482	0,5933	-0,4964	2,49E-11
COT	0,6879	0,1000	0,1308	0,0213	0,1023	-0,6991
COp	0,3059	0,5109	-0,4290	-0,2620	0,5124	0,3609
COam	0,6003	-0,1854	0,3989	0,1773	-0,1837	0,6173
ArgT	0,0821	-0,4996	-0,4541	0,6225	0,3873	2,54E-11
AT	-0,2565	0,3244	0,6099	0,4001	0,5449	-9,61E-12
Camada 0,05-0,10 m						
V%	0,4790	-0,0004	0,0721	0,0185	0,8747	-3,38E-11
COT	0,5812	0,0682	0,0675	0,1360	-0,3267	-0,7264
COp	0,3267	0,5438	0,2839	-0,6220	-0,1889	0,3073
COam	0,5236	-0,1913	-0,0622	0,4717	-0,2917	0,6147
ArgT	0,0144	-0,6631	0,7096	-0,2296	-0,0618	-1,29E-11
AT	-0,2273	0,4726	0,6342	0,5649	0,0605	3,89E-11
Camada 0,10-0,20 m						
V%	0,3333	0,5077	-0,0393	-0,4633	0,6442	2,88E-08
COT	0,5885	0,1173	-0,1941	0,4470	-0,0873	-0,6284
COp	-0,0961	0,7911	-0,0319	0,3583	-0,3180	0,3666
COam	0,5903	-0,3153	-0,1607	0,2179	0,0899	0,6861
ArgT	0,0743	-0,0036	0,8969	0,3447	0,2670	5,12E-07
AT	-0,4235	-0,0570	-0,3600	0,5394	0,6300	5,74E-07
Camada 0,20-0,40 m						

Tabela 5. Continuação

V%	0,5424	-0,4018	-0,4588	0,5778	-	-
COT	0,4863	-0,2638	0,8328	0,0214	-	-
ArgT	0,3034	0,8664	0,0873	0,3869	-	-
AT	-0,6142	-0,1357	0,2972	0,7183	-	-

Os primeiros componentes, sobretudo o CP1, apresentaram as maiores contribuições no zoneamento do bananal. Na camada de 0-0,05 m os atributos COT, V% e AT nos componentes 1, 2 e 3, respectivamente, foram os de maiores pesos e, portanto, as variáveis que mais definiram as unidades homogêneas na área em estudo. Os atributos do solo nas seguintes profundidades apresentaram suas contribuições: em 0,05-0,10 m, COT (CP1) e ArgT (CP 2 e 3); em 0,10-0,20 m, COam (CP1), COp (CP2) e ArgT (CP3); em 0,20-0,40 m, AT (CP1), ArgT (CP2) e COT (CP3). É notável que principalmente na CP1 todas as variáveis apresentaram suas contribuições no que diz respeito à geração das subunidades no bananal, entretanto, destacou-se a de maior peso dentro de cada componente.

As zonas de manejo formadas pelo processo de clusterização a partir do agrupamento não supervisionado k-médias são apresentadas na Figura 6.

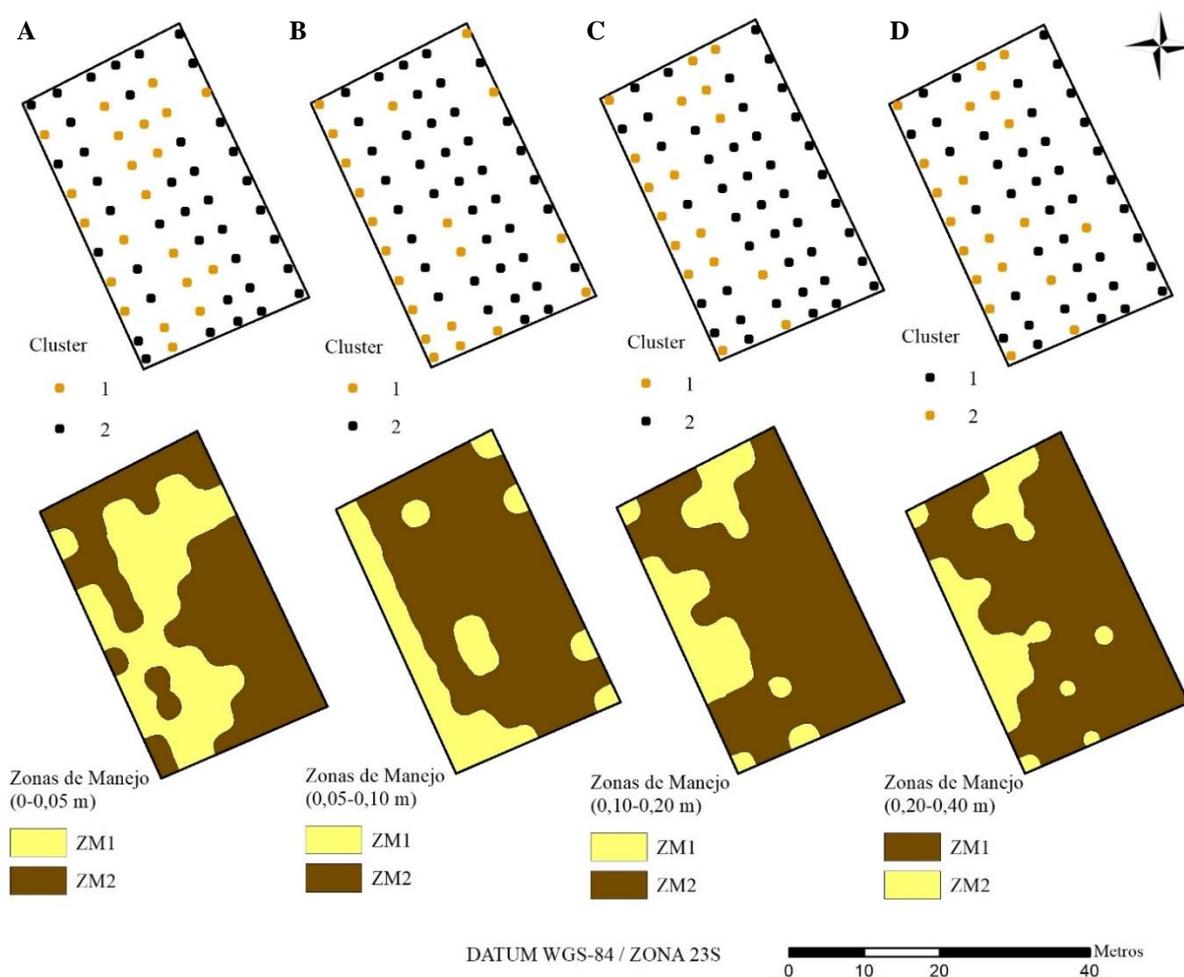


Figura 6. Zonas de manejos geradas em área cultivada com banana BRS Princesa geradas a partir da análise de cluster.

Duas zonas de manejos foram geradas para o bananal, ou seja, realizou-se dois agrupamentos (k=2) no qual pontos de dados formaram grupos de ocorrência natural, sendo o suficiente para verificar uniformidade dentro das subunidades e a variabilidade existente dos atributos do solo entre as zonas. Um baixo número de zonas de manejo, nesse caso dois, propicia praticidade na gestão da área pelo agricultor, fator expressivo para a adoção de gestão específica (RODRIGUES & CORÁ, 2015).

Na Tabela 6 são apresentados os valores médios dos atributos do solo em cada zona de manejo criada e o teste de médias de Tukey a 5% de significância ($p < 0,05$).

Tabela 6. Valores médios dos atributos dentro de cada ZM criada e teste de comparação de médias de Tukey a 5% de significância ($p < 0,05$)

	pH	Ca	Mg	H + Al	Na	K	P	SB	T	V%	COT	COp	COam	ArgT	AT	Silte
	----- cmol _c kg ⁻¹ -----					g kg ⁻¹		cmol _c kg ⁻¹		%	----- g kg ⁻¹ -----					
0-0,05 m																
ZM1	6,6 ^A	3,1 ^A	4,1 ^A	1,6 ^A	0,005 ^A	0,03 ^A	27,8 ^A	7,8 ^A	9,4 ^A	82,7 ^A	20,1 ^A	4,7 ^A	15,5 ^A	241,4 ^A	599,2 ^A	150,9 ^A
ZM2	6,4 ^B	2,4 ^B	4,6 ^A	1,6 ^A	0,006 ^A	0,03 ^A	23,5 ^A	6,5 ^B	8,1 ^B	79,7 ^A	13,8 ^B	3,6 ^A	10,2 ^B	218,6 ^A	617,7 ^A	159,3 ^A
0,05-0,10 m																
ZM1	6,1 ^A	2,6 ^A	4,7 ^A	1,8 ^A	0,003 ^A	0,011 ^A	14,3 ^A	7,3 ^A	9,1 ^A	79,8 ^A	14,4 ^A	2,2 ^A	12,2 ^A	257,2 ^A	544,0 ^B	177,1 ^A
ZM2	5,8 ^B	1,8 ^B	4,4 ^A	2,3 ^A	0,002 ^B	0,007 ^B	13,8 ^A	6,2 ^B	8,5 ^A	72,7 ^B	9,9 ^B	1,0 ^B	8,9 ^B	267,8 ^A	612,8 ^A	118,2 ^B
0,10-0,20 m																
ZM1	5,3 ^A	2,2 ^A	2,8 ^A	2,4 ^A	0,002 ^A	0,008 ^A	14,8 ^A	5,1 ^A	7,5 ^A	66,8 ^A	12,2 ^A	4,2 ^A	8,0 ^A	282,8 ^A	425,8 ^B	291,4 ^A
ZM2	5,2 ^A	1,7 ^B	2,0 ^B	2,7 ^A	0,002 ^A	0,005 ^B	15,8 ^A	3,7 ^B	6,4 ^B	58,3 ^B	9,3 ^B	2,9 ^B	6,3 ^A	218,1 ^B	591,5 ^A	181,4 ^A
0,20-0,40 m																
ZM1	5,2 ^A	1,7 ^B	2,0 ^A	2,7 ^A	0,002 ^A	0,005 ^B	15,9 ^A	3,7 ^B	6,3 ^B	57,7 ^B	9,1 ^B	-	-	222,0 ^B	603,5 ^A	168,4 ^B
ZM2	5,4 ^A	2,2 ^A	2,7 ^A	2,4 ^A	0,002 ^A	0,007 ^A	14,7 ^A	5,0 ^A	7,3 ^A	66,6 ^A	11,2 ^A	-	-	265,3 ^A	426,7 ^B	301,1 ^A

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem entre si na coluna a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A heterogeneidade dos atributos do solo é evidente pelo teste de comparação de médias de Tukey a 5% ($p < 0,05$), em que foi verificado diferentes valores médios entre as zonas de manejo. Esse padrão indica que as zonas de manejo geradas pela análise multivariada permitiram diferenciar as subunidades no bananal, podendo ser recomendados manejos específicos para cada zoneamento. A utilização do teste de médias de Tukey para fins de indicação e validação de zoneamentos na AP tem sido empregada por pesquisadores, como em Davatgar et al. (2012), Tripathi et al. (2015) e Moharana et al. (2020).

Através da análise das camadas do solo foi possível verificar que o V%, COT, COp, COam, ArgT e AT condicionaram o padrão das zonas de manejo, sendo a Zona de Manejo 1 (ZM1) nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 m e a Zona de Manejo 2 (ZM2) na camada 0,20-0,40 m as de maiores teores de saturação por bases, COT, COp e COam, menores teores de areia total e maiores teores de argila total. Nestas regiões verificam-se condições favoráveis ao cultivo e desenvolvimento da banana BRS Princesa, entretanto mesmo tendo sido observados os maiores teores de nutrientes nestas regiões, recomenda-se o emprego da adubação orgânica em menores quantidades quando comparadas com a ZM2 nas camadas 0-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 m e ZM1 na camada 0,20-0,40 m para promover o aumento dos teores de cátions no solo, visto que em toda a área foram observados baixos teores de nutrientes, tais como Ca⁺², K⁺ e P.

Os maiores teores de CO_{am} nas ZM1 na camada superficial indicam associações da fração orgânica do solo com os minerais (silte e argila), protegendo-a do processo de decomposição. Esta fração orgânica apresenta avançado grau de humificação, normalmente é menos sensível às alterações de manejo (ROSSI et al., 2015) e suas maiores concentrações em relação ao C_{Op} no bananal sugerem maior estabilidade do C na área, sobretudo nas ZM1, sugerindo que o manejo do bananal nestas regiões ao longo dos anos tem sido adequado na manutenção da matéria orgânica e, conseqüentemente, na qualidade do solo.

Os maiores teores de C_{OT} e C_{Op} nas ZM1 corroboram esta afirmativa, demonstrando que a MO no solo do bananal pode trazer benefícios como a melhoria da estrutura física e biológica do solo (RIBEIRO et al., 2012). Os menores valores de C_{Op} associados aos maiores teores das frações de areia total nas ZM2 sugerem que a textura arenosa não forneceu proteção física para a matéria orgânica (ROSSI et al., 2015).

Desta maneira, a adubação orgânica em superfície deve ser realizada a fim de incrementar carbono no solo, devendo ser maior incrementada na ZM2, representada pela unidade de menor quantidade de MOS. Assim, esta prática mostra-se imprescindível na manutenção da qualidade do solo e na longevidade do bananal, sendo um manejo sustentável e que pode beneficiar os bananicultores.

A verificação de variabilidade espacial dos atributos do solo e o delineamento de zonas de manejo em pequenos áreas de cultivos agrícolas como o deste trabalho sugerem que a AP pode e deve ser implementada no cotidiano do pequeno e médio agricultor, pois a partir destas ferramentas estratégias de manejo podem ser implementadas, como alternativas para a amostragem de solo e aplicação localizada de adubos e corretivos agrícolas.

4 CONCLUSÕES

As relações espaciais entre os atributos do solo indicam a ocorrência de desbalanço nutricional na área da bananeira. A forte dependência espacial foi verificada para 47% dos atributos avaliados e cerca de 40% dos atributos apresentaram grau de dependência moderados.

Foi possível delinear duas zonas de manejo utilizando métodos geoestatísticos e multivariados para a área de bananeira BRS Princesa. As ZM1 nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m e ZM2 0,20-0,40 m necessitam de menores quantidades de adubação orgânica e correção por fertilizantes em comparação a ZM2 nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m e ZM1 0,20-0,40 m, sendo estas últimas as zonas de maior necessidade de incremento de matéria orgânica no solo.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, R. L. **Map locator of Rio de Janeiro's Seropédica city**, 2006. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RiodeJaneiro_Municip_Seropedica.svg (acesso em 20 out. 2020).
- ANDERBERG, M. R. **Cluster analysis for applications**. New York, USA: Academic Press Inc. 1973.
- BARBOSA, T. C. S.; LACERDA, C. F.; BARBOSA, F. E. L.; BRAZ, R. S.; COSTA, M. C. G. Carbon and chemical fractionation of soil organic matter in irrigated banana plantation subjected to conservation practice. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 6, p. 42049-42063, 2020. DOI:10.34117/bjdv6n6-661.
- BATISTA, P. H. D.; MONTENEGRO, A. A. A.; ALMEIDA, G. L.P.; TAVARES, U. E.; RODRIGUES, R. A. S. Variabilidade espacial da resistência à penetração e teor de água em neossolo cultivado com banana no agreste pernambucano. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 27, n. 1, p. 54-60, 2019. <https://doi.org/10.13083/reveng.v27i1.881>.
- BORGES, A. L. **Banana em foco: Interação entre Nutrientes em Bananeira**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/ Embrapa Mandioca e Fruticultura, n. 55, 2004.
- BORGES, A. L et al. Nutrição e adubação. In: FERREIRA, C. F.; SILVA, S. O.; AMORIM, E. P.; SEREJO, J. A. S. (Org.). **O agronegócio da banana**. 1ed. Brasília, DF: Embrapa, v. 1, p. 331-398, 2016.
- BRONSON, K. Looking through a responsible innovation lens at uneven engagements with digital farming. **NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences**, v. 763, p. 90–91, e100294, 2019.
- CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, p. 777-783, 1992. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x>.
- 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**, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>.
- CANTÚ, M. P.; BECKER, A.; BEDANO, J. C.; SCHIAVO, H. F. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. **Ciencia del Suelo**, v. 25, n. 2, p. 173-178, 2007.
- DAVATGAR, N.; NEISHABOURI, M. R.; SEPASKHAH, A. R. Delineation of site specific nutrient management zones for a paddy cultivated area based on soil fertility using fuzzy clustering. **Geoderma**, v. 173–174, p. 111–118, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.12.005>.
- DAY, P. R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, v. 1, p. 545-556, 1965.

DONATO, S. L. R.; SANTOS, M. R.; ARANTES, A. M.; RAMOS, A. V. ‘Prata-Anã’ banana under irrigation levels, planting densities and bunch trimming. **Revista Brasileira de Fruticultura**, 2020, v. 42, n. 5, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0100-29452020044>.

EMPRESA BRASILEIRA DE AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, 2020a. **Produção brasileira de banana em 2019**. http://www.cnpmf.embrapa.br/Base_de_Dados/index_pdf/brasil/banana/banana_brasil.htm (acesso em 08 jan. 2021).

EMPRESA BRASILEIRA DE AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, 2020b. **Tecnologias para produção de banana na Amazônia é tema de live no canal Embrapa no Youtube**. <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/53274265/tecnologias-para-producao-de-banana-na-amazonia-e-tema-de-live-no-canal-embrapa-no-youtube> (acesso em 01 dez. 2020).

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE INC - ESRI. **ArcGIS® 10.5: New Release Transforms Enterprise GIS**. Redlands, 2016.

FREDDI, O. S.; TAVANTI, R. F. R.; SOARES, M. B.; ALMEIDA, F. T.; PERES, F. S. C. Physical-chemical quality of a Latossol under direct seeding and soybean-corn succession in the Cerrado-Amazonian ecotone. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 4, p. 901-1000, 2017. <https://doi.org/10.1590/1983-21252017v30n420rc>.

FREIRE, L. R et al. **Manual de calagem e adubação do Estado do Rio de Janeiro**. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa; Seropédica, RJ: Editora Universidade Rural, 2013. 430 p.

FREITAS, A. S.; POZZA, E. A.; POZZA, A. A. A; OLIVEIRA, M. G. F.; SILVA, H. R.; ROCHA, H. S; GALVÃO, L. R. Impact of nutritional deficiency on Yellow Sigatoka of banana. **Australasian Plant Pathol.**, v. 44, p. 583–590, 2015.

GOOGLE. **Google Earth**, 2021. <https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/> (acesso em 08 jan. 2021).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS – IBGE, 2019. **Indicadores IBGE - Levantamento Sistemático da Produção Agrícola Estatística da Produção Agrícola/dezembro 2019**. https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/2415/epag_2019_dez.pdf (acesso em 20 nov. 2020).

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET, 2020. **INMET Tempo**. <http://www.inmet.gov.br/portal/> (acesso em 06 jan. 2021).

JACINTHO, J. L; FERRAZ, G. A. S.; SILVA, F. M.; SANTOS, S. A. Management zones in coffee cultivation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 94-99, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n2p94-99>.

LANZA, T. R.; MACHADO, A.F.L.; MARTELLETO, L.A.P. Effect of planting densities of “BRS Princess” banana tree in the suppression of weeds. **Planta daninha**, vol. 35, e017162958, 2017. <https://doi.org/10.1590/s0100-83582017350100054>.

MALDONADO, J. F. M.; IDE, C. D.; BARROS, J. C. S. M.; VIEIRA, A.; RÊGO FILHO, L. M.; GRAÇA, J. A produção de banana em pequenas áreas no estado do Rio de Janeiro. **Informação Tecnológica PESAGRO-RIO**, n. 84, 2016.

MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. **Química e Mineralogia do Solo - Conceitos Básicos e Aplicações**. 3. reimp. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. único, 2019. 1381 p.

MENEZES, A. J. E. A.; GALVÃO, E. U. P. **Bananeira**: Recomendações de Cultivo. Comunicado Técnico Embrapa, Belém, n. 113, p. 1- 4, 2004.

MOHARANA, P. C.; JENA, R. K.; PRADHAN, U. K.; NOGIYA, M.; TAILOR · B. L.; SINGH · R. S.; SINGH, S. K. Geostatistical and fuzzy clustering approach for delineation of site-specific management zones and yield-limiting factors in irrigated hot arid environment of India. **Precision Agriculture**, v. 21, p. 426–448, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09671-9>.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. F. **Agricultura de precisão**. 1.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 238 p.

NOMURA, E. S.; CUQUEL, F. L.; DAMATTO JUNIOR, E. R.; FUZITANI, E. J.; BORGES, A. L.; SAES, L. A. Nitrogen and potassium fertilization on ‘Caipira’ and ‘BRS Princesa’ bananas in the Ribeira Valley. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 8, p. 702-708, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n8p702-708>.

OLEA, R. A. **Geostatistics for engineers and Earth scientists**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999. 303 p.

REZENDE, J. O. **Consequências da aplicação de vinhaça sobre algumas propriedades físicas de um solo Aluvial (estudo de um caso)**. 112p. 1979. Tese (Doutorado em Agronomia - Solos e Nutrição de Plantas). Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba.

RIBEIRO, L. R.; OLIVEIRA, L. M.; SILVA, S. O.; BORGES, A. L. Caracterização física e química de bananas produzidas em sistemas de cultivo convencional e orgânico. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 34, n. 3, p. 774-782, 2012.

RIBEIRO, L. R.; OLIVEIRA, L. M.; SILVA, S. O.; BORGES, A. L. Avaliação de cultivares de bananeira em sistema de cultivo convencional e orgânico. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 35, n. 2, p. 508-517, 2013.

RODRIGUES, M. S.; CORÁ, J. E. Management zones using fuzzy clustering based on spatial-temporal variability of soil and corn yield. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 3, p. 470-483, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n3p470-483/2015>.

RODRIGUES JUNIOR, F. A.; VIEIRA, L. B.; QUEIROZ, D. M.; SANTOS, N. T. Geração de zonas de manejo para cafeicultura empregando-se sensor SPAD e análise foliar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 8, p. 778–787, 2011.

RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento Embrapa Monitoramento por Satélite, Campinas, n. 8, p. 1-26, 2010, 1. ed. reimp.

ROSADO, T. L.; MONÇÃO, O. P.; GONTIJO, I.; PIRES, F. R. Efeito da cobertura vegetal nos atributos físicos de um Latossolo Amarelo cultivado com banana. **Enciclopédia Biosfera**, v. 8, p. 721-728, 2012.

ROSSI, C. Q.; PEREIRA, M. G.; AQUINO, A. M.; LIMA, S. S.; BERBARA, R. L. L. Atributos químicos e físicos de solo cultivado com Oleráceas em microbacia hidrográfica, após desastre ambiental. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 39, p. 1764-1775, 2015. DOI: 10.1590/01000683rbc20140253

SANTI, A. L.; AMADO, T. J. C.; CHERUBIN, M. R.; MARTIN, T. N.; PIRES, J. L.; FLORA, L. P. D.; BASSO, C. J. Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitantes à produtividade de grãos. **Pesq. agropec. bras.**, v. 47, n. 9, p. 1346-1357, 2012.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

SÁNCHEZ, D. A. C.; JARAMILLO, D. F. J.; TORRES, J. M. C. Componentes de la variabilidad espacial en el manejo por sitio específico en banana. **Pesq. agropec. bras.**, v. 45, n. 8, p. 836-845, 2010.

SILVA, J. T. A.; SILVA, I. P.; PEREIRA, R. D. Adubação fosfatada em mudas de bananeira ‘Prata anã’ (AAB), cultivadas em dois Latossolos. **Revista Ceres**, v. 58, n. 1, p. 238-242, 2011.

TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p.

UCHÔA, C. N.; POZZA, E. A.; POZZA, A. A. A.; MORAES, W. S. Modelagem geoestatística da Sigatoka-Negra e sua relação com a fertilidade do solo. **Biosci. J.**, v. 27, n. 3, p. 357-362, 2011.

VILLARREAL-NÚÑEZ, J.; PLA-SENTIS, I.; AGUDO-MARTÍNEZ, L.; VILLALÁZ-PÉREZ, J.; ROSALES, F.; POCASANGRE, L. Índice de calidad del suelo en áreas cultivadas con banano en Panamá. **Agronomía Mesoamericana**, v. 24, n. 2, p. 301-315, 2013. <http://dx.doi.org/10.15517/AM.V24I2.12530>.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.), **Applications of soil physics**. Academic press, 1980. p. 319–344.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. **A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil**. Communications in Soil Science and Plant Analysis, New York, v. 19, n. 13, p. 1467-1476, 1988.

ZUCOLOTO, M.; LIMA, J. S. S.; COELHO, R. I. Correlação e variabilidade espacial de atributos químicos do solo e produção de bananeira “Prata-Anã”. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.e., p. 479-484, 2011a.

ZUCOLOTO, M.; LIMA, J. S. S.; COELHO, R. I.; QUARTEZANI, W. Z. Variabilidade espacial das frações granulométricas e da produção de bananeira 'Prata Anã'. **IDESIA**, v. 29, n. 2, p. 47-52, 2011b.

CAPÍTULO III: INVESTIGAÇÃO ESPACIAL DA RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO E SEUS IMPACTOS EM CULTIVO DA BANANEIRA ‘BRS PRINCESA’

RESUMO

SILVA, Eudocio Rafael Otavio da. **Investigação espacial da resistência do solo à penetração e seus impactos em cultivo da bananeira 'BRS Princesa'**. 2021. 92p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2021.

A resistência do solo a penetração (RSP) é um dos principais indicadores da qualidade física do solo e sua relação com os atributos químicos e biológicos do solo é condicionante a produtividade de culturas. O objetivo deste trabalho foi investigar a variabilidade espacial da RSP em áreas de cultivo da bananeira BRS Princesa, avaliar seus efeitos nos atributos químicos e físicos do solo que possam estar interferindo no desenvolvimento do bananal e indicar manejo localizado a partir de subsolagem em profundidade variada. O experimento foi realizado no setor de Horticultura da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica-RJ, em área de cultivo da banana BRS Princesa. Ao longo das linhas e entrelinhas do bananal foi gerada uma grade amostral constituída de 60 pontos georreferenciados, com 3 subamostras para a obtenção da RSP, totalizando 180 amostras. A RSP foi obtida a partir do índice de cone (IC) utilizando-se um penetrômetro de impacto e mensurou-se o IC até a profundidade de 0,40 m. Em cada ponto georreferenciado foram coletadas amostras de terra deformadas nas profundidades de 0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m e realizou-se as análises dos atributos do solo pH, Ca, Mg, Al, Na, K trocáveis, P assimilável, acidez potencial, soma de bases trocáveis (SB), capacidade de troca catiônica total (Valor T), saturação por bases (V%), frações granulométricas de areia total, argila total e silte, carbono orgânico total (COT) e fracionamento granulométrico da matéria orgânica do solo (MOS) nas camadas superficiais (0-0,05; 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m), no qual foi obtido o carbono orgânico particulado (CO_p) e o carbono orgânico associado aos minerais (CO_{am}). Os dados obtidos foram submetidos a estatística descritiva, análise exploratória e correlação linear de Pearson a 5% de significância ($p < 0,05$). Para a confecção dos mapas de variabilidade espacial foi realizado estudo geostatístico a partir da modelagem de semivariogramas e krigagem ordinária. Os valores da RSP em profundidade sugerem maior compactação em subsuperfície, com amplitudes de valores de RSP de 0,63 a 15,94 MPa em profundidade, apresentando-se superiores quando comparados a outros estudos em bananais. As correlações significativas ($p < 0,05$) entre os valores de RSP e atributos do solo indicam efeitos nas interações organo-minerais e, conseqüentemente, prejuízos as bananeiras, sobretudo na camada de 0,10-0,20 m, devendo ser realizados manejos que melhorem as condições edáficas do bananal. Os valores de RSP acima de 8,0 MPa foram estabelecidos como sendo altos o suficiente para a indicação de manejos localizados a fim de diminuir a RSP, indicando-se o preparo de solo mecanizado a partir de subsolagem localizada em profundidade variada. Verificou-se que 46,7% da área total do bananal não necessita de subsolagem, devendo ser realizada subsolagem localizada até a profundidade de 0,40 m, 0,30 m e 0,20 m em 48%, 4,9% e 0,4% do bananal, respectivamente, indicando que a subsolagem em profundidade variada e em regiões específicas representará menor gasto de energia e de combustível e redução da emissão de carbono para a atmosfera comparados a realização desta prática pelo método convencional.

Palavras-chave: compactação do solo, subsolagem localizada, variabilidade espacial.

ABSTRACT

SILVA, Eudocio Rafael Otavio da. **Spatial investigation of soil resistance to penetration and its impacts on banana cultivation 'BRS Princesa'**. 2021. 92p. Dissertation (Master Science in Agricultural and Environmental Engineering). Institute of Technology, Engineering Department, Rural Federal University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2021.

Soil resistance to penetration (SPR) is one of the main indicators of the physical quality of the soil and its relationship with the chemical and biological attributes of the soil is a determinant of crop productivity. The objective of this work was to investigate the spatial variability of SPR in an area cultivated with 'BRS Princesa' banana, to evaluate its effects on the chemical and physical attributes of the soil that may be interfering in the development of the banana plantation and to indicate localized management from subsoiling at different depths. The experiment was carried out in the Horticulture sector of the Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica-RJ, in a banana cultivation area BRS Princesa. A sampling grid consisting of 60 georeferenced points was generated along the lines and lines of the bananal, with 3 subsamples to obtain the SPR, totaling 180 samples. The SPR was obtained from the cone index (CI) using an impact penetrometer and the CI was measured to a depth of 0.40 m. At each georeferenced point, deformed soil samples were collected at depths of 0-0.05, 0.05-0.10, 0.10-0.20 and 0.20-0.40 m and analyzes of soil attributes pH, Ca, Mg, Al, Na, exchangeable P, assimilable P, potential acidity, sum of exchangeable bases (SB), total cation exchange capacity (T value), base saturation (V%), granulometric fractions of total sand, total clay and silt, total organic carbon (TOC) and particle size fractionation of soil organic matter (SOM) in the layers superficial (0-0.05, 0.05-0.10 and 0.10-0.20 m), in which particulate organic carbon (POC) and organic carbon associated with minerals (MAOC) were obtained. The data obtained were submitted to descriptive statistics, exploratory analysis and Pearson's linear correlation at 5% significance ($p < 0.05$). To make the spatial variability maps, a geostatistical study was carried out based on the modeling of semivariograms and ordinary kriging. The values of SPR in depth suggest greater compaction in subsurface, with amplitudes of SPR values from 0.63 to 15.94 MPa in depth, being superior when compared to other studies in bananas. Significant correlations ($p < 0.05$) between SPR values and soil attributes indicate effects on organo-mineral interactions and, consequently, damage to banana trees, especially in the 0.10-0.20 m layer, and should be performed managements that improve the edaphic conditions of the banana plantation. SPR values above 8.0 MPa were established as being high enough to indicate localized management in order to decrease SPR, indicating mechanized soil preparation from subsoiling located at varying depths. It was found that 46.7% of the total area of the banana plantation does not require subsoiling, and localized subsoiling should be carried out to a depth of 0.40 m, 0.30 m and 0.20 m in 48%, 4.9% and 0.4% of the banana plantation, respectively, indicating that subsoiling at varying depths and in specific regions will represent less energy and fuel expenditure and reduced carbon emissions to the atmosphere compared to the practice of this practice by the conventional method.

Keywords: soil compaction, localized subsoiling, spatial variability.

1 INTRODUÇÃO

Cultivada em aproximadamente 135 países, a cultura da banana é um dos grandes destaques da fruticultura e comércio agrícola mundial, proporcionando cerca de 12 bilhões de dólares por ano em exportações (FAO, 2020a). A cultura da banana apresentou em 2018 cerca de 5.728.680 hectares em área colhida mundialmente, 115.737.861 toneladas em quantidade produzida e um rendimento de 20,20 toneladas por hectare (FAO, 2018). O Brasil é o quinto maior produtor mundial com cerca de 7.113.594 toneladas em 2019 (IBGE, 2019), sendo o quarto país com maior área colhida no mundo (FAO, 2018). A maior parte do cultivo da banana é realizada por pequenos agricultores e de perfil familiar (FAO, 2020a) e são importantes para as políticas de crescimento econômico e segurança alimentar, sendo verificada juntamente à outras frutas tropicais como um dos setores agrícolas com maiores projeções de crescimento para os próximos anos (FAO, 2020b).

Neste cenário pode-se destacar a BRS Princesa, uma variedade desenvolvida pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) que apresenta sabor e aroma muito próximas da banana maçã, considerada uma das mais populares no comércio brasileiro e atualmente escassas devido a murcha de *Fusarium* (EMBRAPA, 2018). A banana BRS Princesa apresenta resistência às sigatokas amarela e negra e à murcha de *Fusarium* e tem sido bem aceita pelos polos comerciais de fruticultura. Esta variedade possui qualidade para o cultivo por necessitar de menor lâmina de irrigação e maior resistência à menores temperaturas que outras variedades sem perder em termos de produtividade (EMBRAPA, 2018).

Entretanto para expressarem seu máximo potencial produtivo a qualidade dos solos deve ser verificada, visto que o impedimento do desenvolvimento das raízes das bananeiras devido a condições físicas dos solos tem sido indicado como um dos principais fatores para a baixa produtividade em bananais (PATTISON et al., 2005; VILLARREAL-NÚÑEZ et al., 2013). As raízes da bananeira são sensíveis a compactação e à alta resistência a penetração (MIOTTI et al., 2013; OLIVARES et al., 2020) e se cultivadas nestas condições pode ocorrer uma diminuição significativa do número total de folhas, da área foliar média e total, do diâmetro do pseudocaule e da altura da planta de sucessão (VILLARREAL-NÚÑEZ et al., 2013).

A resistência do solo a penetração (RSP) é um dos principais indicadores da qualidade física do solo e sua relação com os atributos químicos e biológicos do solo é condicionante a produtividade de culturas. As interações que ocorrem na solução do solo podem ser limitadas pela sua alta resistência a penetração, pois a diminuição da macroporosidade do solo devido a compactação ocasiona a diminuição do fluxo de água e nutrientes e, conseqüentemente, afetam diretamente o crescimento radicular e o desenvolvimento das culturas (TIECHER, 2016; CORTEZ et al., 2020). As relações da RSP com a produtividade em bananais foram investigadas por Olivares et al. (2020) em seis campos de produção de banana nos Estados de Aragua e Trujillo na Venezuela e os autores concluíram que a RSP é um dos atributos que mais contribui na geração e caracterização de índices de produtividade do solo em bananeiras no país.

Neste contexto, as bananeiras devem ser cultivadas em áreas adequadas quanto a aeração, disponibilidade hídrica, umidade e granulometria do solo, entre outras condições; além de bem manejadas quanto a adubação, densidade de plantio e tratos culturais (EMBRAPA, 2020a). O manejo dos bananais geralmente está mais relacionado às práticas manuais do que mecanizadas, como o plantio manual dos pseudocaulos, desbaste, desfolha, aplicação de fertilizantes e colheita de maneira manual (EMBRAPA, 2020a). Desta maneira, os impactos relacionados a compactação do solo e a RSP em bananais estão relacionados ao manejo do solo e da cultura, heranças do preparo convencional e à fatores relacionados à gênese do solo.

Estudos que avaliam a variabilidade espacial da RSP e seus efeitos em atributos do solo cultivados com cereais, gramíneas e leguminosas são facilmente encontrados na literatura

(GUIMARÃES et al., 2013; JIN et al., 2015; NYÉKI et al., 2017; FURQUIM et al., 2020), sendo pouco explorado em pomares, sobretudo em cultivos de bananeiras. As abordagens utilizando procedimentos geoestatísticos e de inferência espacial de atributos do solo podem sugerir manejos localizados que tragam benefícios aos bananicultores, como o entendimento de atributos do solo que podem estar interferindo no desenvolvimento da cultura em regiões específicas dos bananais ou mesmo indicações de manejo localizado que reduzam os custos com operações mecanizadas de preparo de solo em áreas a serem implantados ou renovados bananais, como a escarificação e subsolagem.

De maneira geral, investigar a resistência do solo a penetração, entender a relação desta variável com atributos do solo e indicar gestão localizada no bananal pode trazer discussões significativas, pois dependendo do manejo da cultura e da variação espacial de nutrientes, umidade e granulometria do solo, por exemplo, podem ser obtidas diferentes respostas sobre a compactação no solo.

Assim, o objetivo deste trabalho foi i) investigar a variabilidade espacial da resistência do solo a penetração em cultivo da bananeira BRS Princesa, ii) avaliar seus efeitos nos atributos químicos e físicos do solo que possam estar interferindo no desenvolvimento do bananal e iii) indicar manejo localizado a partir de subsolagem em profundidades variadas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição da Área de Estudo e Histórico

O experimento foi realizado no setor de Horticultura da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Seropédica – RJ (22° 45' 08.62" S e 43° 40' 28.50" W), em área de cultivo da banana cultivar 'BRS Princesa'. O clima da região é tropical úmido (Aw, de acordo com a classificação de Köppen) com verões úmidos e invernos secos. A temperatura média anual compensada da região é de 24°C e a precipitação média de 1260 mm. O solo da área experimental foi classificado como Argissolo Amarelo (SANTOS et al., 2018), localizado em área de relevo suave ondulado, com altitude de 27 m.

O bananal possui 1829,8 m² e foi implantado em agosto de 2014 com diferentes densidades de plantio ao longo da área experimental, sendo 1200 (3,33 m x 2,5 m), 1600 (2,5 m x 2,5 m), 2000 (2,0 m x 2,5 m), 2400 (1,67 m x 2,5 m), 2800 (1,43 m x 2,5 m) e 3200 (1,25 m x 2,5 m) plantas por hectare. Para mais detalhes sobre o adensamento de plantas e idealização do bananal consultar Lanza et al. (2017).

Historicamente, o preparo do solo para a implementação do bananal foi realizado a partir de uma aração, duas gradagens, uma subsolagem a 0,50 m de profundidade e sulcamento. A irrigação era realizada por aspersão fixa de subcopia nos primeiros anos de cultivo do bananal, entretanto atualmente a área experimental não possui mais um sistema de irrigação.

2.2 Geração do Banco de Dados Georreferenciados

Ao longo das linhas e entrelinhas do bananal foi gerada uma grade amostral constituída de 60 pontos georreferenciados, com 3 subamostras em cada ponto para a obtenção da RSP, totalizando 180 amostras, consistindo em uma amostragem sistemática com grade semirregular (Figura 1). Todos os pontos relacionados aos locais de amostragem foram georreferenciados e coletados com a utilização de Estação Total Leica, Série TPS300 Basic, nas coordenadas cartesianas bidimensionais UTM para a zona 23S.

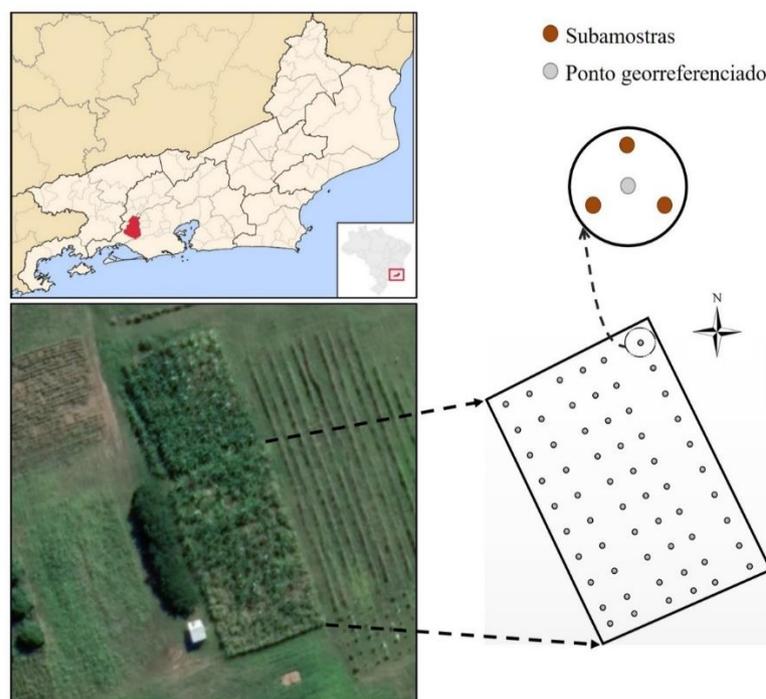


Figura 1. Área experimental localizada no município de Seropédica-RJ e distribuição da malha amostral para avaliação da RSP no bananal (Fonte: ABREU, 2006; GOOGLE EARTH, 2020).

A RSP foi obtida a partir do índice de cone (IC) utilizando-se um penetrômetro de impacto, modelo IAA/Planalsucar-Stolf (STOLF et al., 1983), com ângulo de cone de 30°. Este aparelho possui uma haste que se desloca verticalmente no solo quando exercida uma força emitida por um peso que cai em queda livre e possui um cone metálico na ponta de sua haste simulando a raiz de uma planta. A obtenção da RSP (MPa) obtida pelo índice de cone indica a resistência mecânica ao crescimento das raízes das plantas. A análise do IC foi mensurada até a profundidade de 0,40 m e os dados obtidos foram estimados em 0-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,15, 0,15-0,20, 0,20-0,25, 0,25-0,30, 0,30-0,35 e 0,35-0,40 m.

O estudo foi realizado em julho de 2019, estação de inverno caracterizado como seco e de baixas precipitações pluviométricas (Figura 2). Foi realizada a avaliação da umidade gravimétrica do solo pelo método da umidade atual (TEIXEIRA et al., 2017), consistindo em umidades médias do solo em torno de 10,8, 9,6, 11,4 e 12,0% para as camadas de 0-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente.

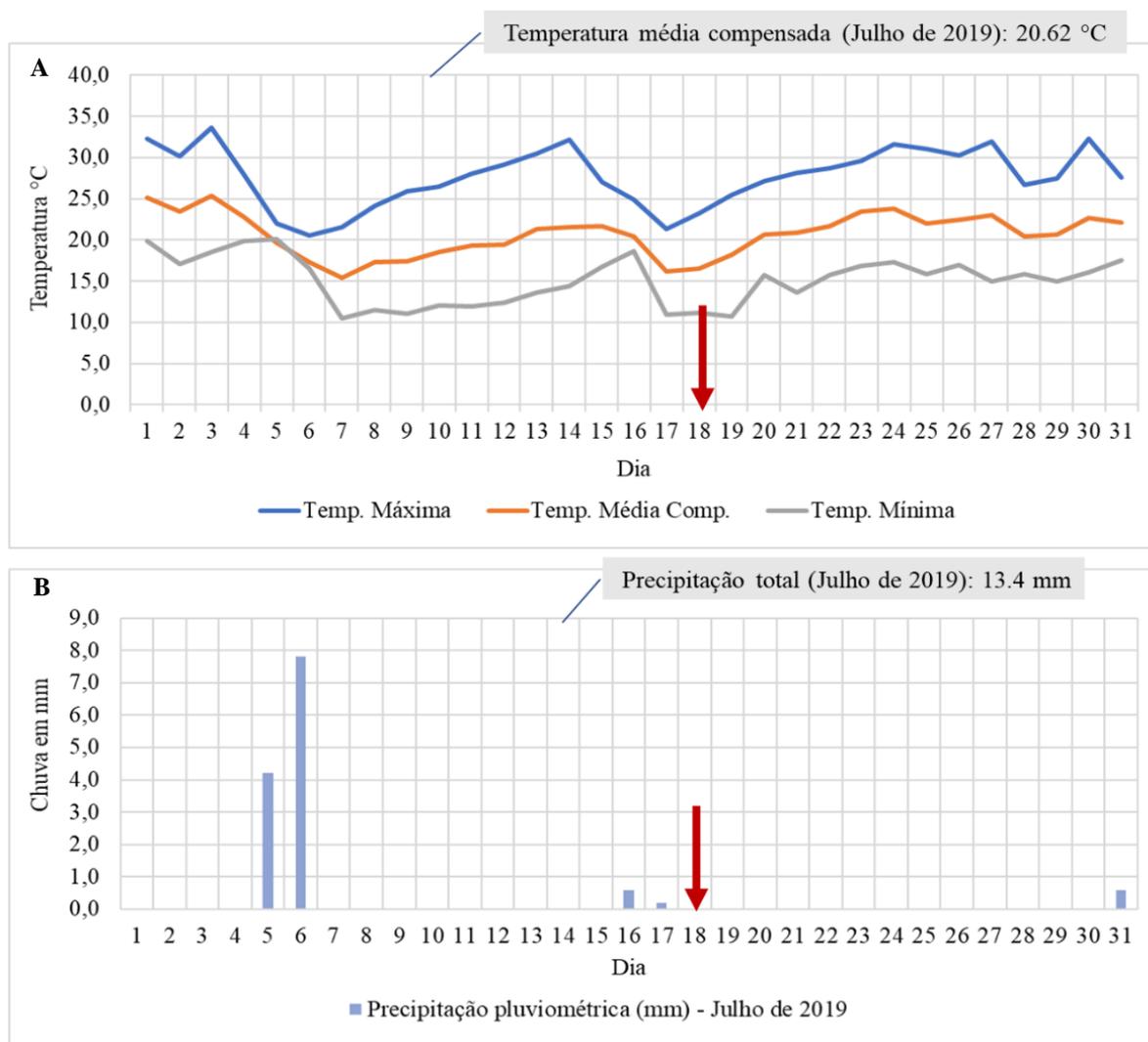


Figura 2. Temperaturas máximas, médias e mínimas (°C) (A) e dados de precipitação pluviométrica (B) para a região de Seropédica-RJ no mês de julho de 2019, período de experimentação e avaliação da RSP. A seta em vermelho indica o período de amostragem e obtenção das variáveis em estudo. Fonte: INMET, 2020.

Buscando-se obter informações de suporte que pudessem servir de discussões nos resultados, foi realizada amostragem de solos na mesma grade amostral em que foram realizadas as avaliações de RSP. Para isto, foram coletadas amostras de solo deformadas nos 60 pontos georreferenciados, nas profundidades de 0-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m e realizadas análises de características químicas: pH, Ca, Mg, Al, H + Al, Na, K, P, soma de bases trocáveis (SB), capacidade de troca catiônica (Valor T), saturação por bases (V%) segundo Teixeira et al. (2017); análise granulométrica em que foram obtidos os valores das frações de areia total, argila total e silte (DAY, 1965; REZENDE, 1979); além de atributos da matéria orgânica do solo (MOS): carbono orgânico total (COT) segundo Yeomans e Bremner (1988) e fracionamento granulométrico da MOS nas camadas superficiais (0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m) segundo Cambardella e Elliott (1992), no qual foi obtido o carbono orgânico particulado (COp) e carbono orgânico associado aos minerais (COam). Os valores médios dos atributos do solo na área do bananal são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores médios dos atributos do solo obtidos a partir da malha amostral no bananal

Variável	Profundidade			
	0,0-0,05 m	0,05-0,10 m	0,10-0,20 m	0,20-0,40 m
pH	6,48	5,92	5,25	5,90
Ca (cmol _c kg ⁻¹)	2,67	2,06	1,87	1,84
Mg (cmol _c kg ⁻¹)	4,25	4,50	2,22	2,81
Al (cmol _c kg ⁻¹)	0,00	0,00	0,07	0,09
H + Al (cmol _c kg ⁻¹)	1,61	2,15	2,58	3,19
Na (cmol _c dm ⁻³)	0,006	0,002	0,002	0,007
K (cmol _c dm ⁻³)	0,028	0,008	0,006	0,006
P (mg L ⁻¹)	24,99	13,94	15,50	6,67
SB (cmol _c dm ⁻³)	6,96	6,57	4,10	4,66
Valor T (cmol _c dm ⁻³)	8,56	8,72	6,68	7,85
V%	80,74	75,05	60,70	58,62
Argila total (g kg ⁻¹)	226,60	264,25	236,40	263,17
Areia total (g kg ⁻¹)	611,23	589,85	544,55	630,93
Silte (g kg ⁻¹)	156,35	137,80	212,58	94,67
COT (g kg ⁻¹)	15,99	11,42	10,08	5,46
COp (g kg ⁻¹)	3,96	1,42	7,82	-
COam (g kg ⁻¹)	12,03	10,01	2,27	-

2.3 Estatísticas, Geoestatísticas e Geração dos Mapas de Variabilidade Espacial

Utilizando o software PAST 3.5 os dados obtidos sobre cada variável do solo foram submetidos a estatística descritiva e análise exploratória, em que foram avaliados os seus valores mínimos, máximos, médios, mediana, de assimetria e curtose, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV%) segundo Warrick e Nielsen (1980). Foi verificada a presença de outliers e a distribuição normal dos dados a partir de teste de normalidade de Shapiro-Wilk a 5% de significância ($p < 0,05$).

Realizou-se correlação linear de Pearson a 5% de significância ($p < 0,05$) entre os atributos do solo obtidos em laboratório com os valores de RSP procurando-se investigar as

limitações e impactos que a RSP no bananal poderia estar influenciando nos atributos químicos e físicos do solo.

Para a geração dos mapas de variabilidade espacial foi realizado estudo geostatístico a partir da modelagem de semivariogramas para cada variável em estudo, em que foi verificada a semivariância dos dados em relação à distância (Equação 1). Para o desenvolvimento desta etapa utilizou-se o software R Studio 3.5.1.

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

Em que: (h) é a semivariância estimada, N (h) é o número de pares de dados experimentais separados pelo vetor h, e Z representa os valores das medidas dos atributos do solo.

Os semivariogramas teóricos foram testados para os modelos exponencial, esférico e gaussiano e foram ajustados a partir do método da Máxima Verossimilhança, visando a diminuição dos erros quadráticos contidos nos modelos. Realizou-se validação cruzada dos dados e a escolha do melhor modelo ajustado para cada variável foi determinada pelo erro médio reduzido (\overline{ER}) mais próximo de zero, o desvio padrão do erro médio reduzido (S_{ER}) mais próximo de um e o menor valor do Critério de Informação de Akaike (AIC) dentre os modelos.

A determinação do modelo ajustado de semivariograma permitiu estimar os parâmetros variográficos efeito pepita, patamar e alcance, e, juntamente a krigagem ordinária, foi possível realizar a inferência espacial dos locais não amostrados na área experimental das variáveis em estudo. Os mapas de variabilidade espacial foram gerados utilizando-se o software ArcGis 10.5 (ESRI, 2016). O grau de dependência espacial (GDE) dos atributos do solo foi verificado a partir do que foi pressuposto por Cambardella et al. (1994).

2.4 Mapeando a Subsolagem em Profundidades Variadas

Com base na literatura e a partir dos resultados obtidos na área experimental foi estabelecido um valor de RSP para fins de manejo no solo. Desta maneira, os pontos que apresentaram valores iguais ou maiores ao valor de RSP estabelecido foram classificados como regiões que necessitam de subsolagem em profundidades variadas. O mapa de subsolagem a profundidades variadas foi realizado a partir de krigagem ordinária no software ArcGis 10.5 (ESRI, 2016).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estatística descritiva dos valores da RSP obtidos nas diferentes profundidades do solo é descrita na Tabela 2.

Tabela 2. Estatística descritiva da RSP nas camadas do solo em cultivo de banana BRS Princesa

Variáveis	RSP1	RSP2	RSP3	RSP4	RSP5	RSP6	RSP7	RSP8
	MPa							
Min	0,63	2,12	3,00	3,00	4,00	4,00	4,00	2,50
Max	4,00	8,92	14,75	15,53	15,94	15,95	14,23	14,30
Média	2,08	4,90	7,03	7,36	8,29	8,40	7,69	7,59
DP	0,79	1,31	2,28	2,40	2,70	2,77	2,56	2,62
Ass	0,53	0,41	0,81	0,83	0,67	0,63	0,37	0,32
Curt	-0,26	0,51	1,58	1,50	-0,04	-0,18	-0,26	-0,22
CV (%)	37,86	26,75	32,44	32,60	32,63	32,97	33,30	34,49
Valor W	0,97 ^{ns}	0,98 ^{ns}	0,96*	0,96*	0,96*	0,95*	0,98 ^{ns}	0,98 ^{ns}

Min: Mínimo; Max: Máximo; DP: Desvio padrão; Ass: Assimetria; Curt: Curtose; CV(%): Coeficiente de variação; Valor W: Teste de normalidade de Shapiro-Wilk, *significativo a 5% ($p < 0,05$); ns: não significativo no teste de normalidade de Shapiro-Wilk a 5%; RSP1 a RSP8: Resistência do solo a penetração em 0-0,05 (RSP1), 0,05-0,10 (RSP2), 0,10-0,15 (RSP3), 0,15-0,20 (RSP4), 0,20-0,25 (RSP5), 0,25-0,30 (RSP6), 0,30-0,35 (RSP7) e 0,35-0,40 (RSP8) m.

Os valores mínimos, máximos e médios da RSP em cada profundidade avaliada sugerem maior compactação em subsuperfície, com amplitudes de valores de RSP de 0,63 a 15,94 MPa em profundidade. Os valores da RSP obtidos na área experimental foram superiores quando comparados a outros estudos da RSP em bananais. Batista et al. (2019) realizando investigação espacial da RSP em área cultivada com banana prata (*L. Musaceae*) irrigada com sistema de gotejamento na região Agreste de Pernambuco mensuraram valores médios, máximo e mínimo de RSP de 2,55, 2,38 e 2,33 MPa, respectivamente, e umidade gravimétrica de 14,12% na camada de solo de 0-0,15 m.

Investigando atributos físicos do solo que impactam o desenvolvimento das raízes da banana variedade Willians, do subgrupo Cavendish, em área experimental localizada na Chapada do Apodi, município de Limoeiro do Norte – CE, com sistema de irrigação de microaspersão, foram detectados valores de RSP de 5,1 MPa (MIOTTI et al., 2013). Este valor foi considerado pelos autores como limitantes ao desenvolvimento das raízes da bananeira, corroborando com as interpretações de Bengough e Mullins (1990) e Materechera et al. (1991), os quais consideram valores de RSP acima de 1,0 MPa e próximos de 5,0 MPa limitantes ao crescimento das raízes das plantas.

Avaliando a resistência do solo à penetração e ao cisalhamento em um bananal implantado em área de preservação permanente na sub-bacia rio Ribeira de Iguape – SP, Iori et al. (2012) observaram que o cultivo de banana foi o que mais causou compactação à estrutura do Cambissolo Háplico quando comparados a outros usos do solo (pastagem degradada, sistema silvipastoril e mata nativa), em que foram observados valores de RSP em torno de 2,0 MPa com umidade gravimétrica de 41,0 $m^3 m^{-3}$. Esse padrão sugere que os valores médios de RSP do presente estudo apresentou aproximadamente valores dois a três vezes maiores quando comparados com os encontrados em Iori et al. (2012), Miotti et al. (2013) e Batista et al. (2019).

Em todas as camadas foram observados valores de coeficiente de variação classificados como médio ($12 < CV < 60\%$) segundo Warrick e Nielsen (1980). Verificou-se maior valor de

CV e menor desvio padrão na profundidade de 0-0,05 m quando comparadas às demais, indicando menores variâncias nesta camada, mesmo sendo afetada principalmente pelo manejo do solo. Este resultado corrobora com os obtidos por Cortez et al. (2020) que observaram maior homogeneidade dos valores de RSP na camada superficial em solo cultivado com cana-de-açúcar. Juntamente ao manejo com adubação orgânica em superfície, o preparo do solo do bananal com aração e gradagem promoveram o revolvimento do solo e atenuaram a compactação do solo.

A significância do teste de normalidade de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$) juntamente aos valores de assimetria e curtose próximos de zero das profundidades avaliadas indicaram tendência à normalidade dos dados. Na Tabela 2 são apresentados os atributos do solo em que observou-se as correlações lineares de Pearson significativas a 5% ($p < 0,05$) com a RSP, sugerindo que a RSP e, indiretamente, a compactação do solo, interferiu de diferentes maneiras nas interações dos nutrientes, matéria orgânica e frações granulométricas na área de estudo.

Tabela 3. Correlações lineares de Pearson significativas a 5% ($p < 0,05$) entre os valores de RSP e os atributos físicos e químicos do solo nas diferentes camadas para a área da banana

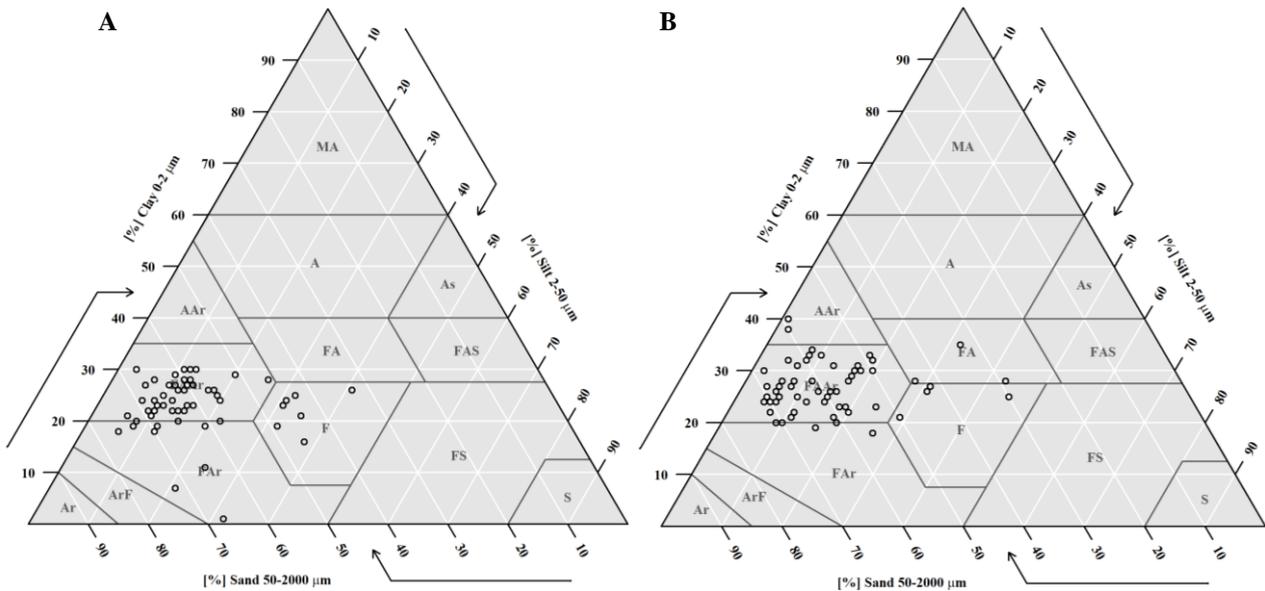
Variável	Coefficiente	Valor p ($p < 0,05$)
RSP1 x Atributos do solo em 0-0,05 m		
Silte	-0,2710	0,0362
RSP2 x Atributos do solo em 0,05-0,10 m		
Na	-0,3072	0,0170
RSP3 x Atributos do solo em 0,10-0,20 m		
Mg	-0,2993	0,0202
P	0,4496	0,0003
Valor T	-0,2728	0,0349
COp	0,4645	0,0002
COam	-0,3668	0,0039
Argila total	-0,2585	0,0461
RSP4 x Atributos do solo em 0,10-0,20 m		
Mg	-0,3069	0,0171
P	0,4663	0,0002
Valor T	-0,2777	0,0317
COp	0,4734	0,0001
COam	-0,3700	0,0036
Argila total	-0,2621	0,0431
RSP7 x Atributos do solo em 0,20-0,40 m		
Na	0,4204	0,0008
COT	0,3756	0,0031
RSP8 x Atributos do solo em 0,20-0,40 m		
Na	0,4339	0,0005
COT	0,3911	0,0020

As correlações significativas observadas na Tabela 3 indicam que a RSP pode estar restringindo o acesso de nutrientes do solo pela bananeira. A correlação negativa da RSP com os valores de Mg^{+2} sugere prejuízos a disponibilidade desse nutriente no solo para a absorção pelas raízes da bananeira a partir do aumento da RSP. Os estudos de Fernandez et al. (1995)

também constataram que houve redução de teores de Mg na parte aérea da soja com o aumento da compactação do solo, pois houve redução do fluxo no solo devido a compactação e, conseqüentemente, na disponibilidade desse nutriente.

As correlações positivas entre a RSP e o P apontam que a maior compactação do solo em subsuperfície ocasionou maior adsorção de P na superfície de colóides do solo e isto implica na diminuição do fluxo difusivo dos íons na solução do solo (RIBEIRO et al., 2010) com as raízes das bananeiras. A realização de adubação fosfatada nestas condições implicará numa maior aplicação de dose de fosfato para possibilitar que o fluxo difusivo esteja em condições adequadas no solo em relação a demanda para a bananeira. Ribeiro et al. (2010) também chegaram a este entendimento avaliando a compactação do solo em relação ao acúmulo de P em plantas de soja, em que foram observados menores acúmulos de P em solos mais compactados, sobretudo os de textura mais argilosa.

As correlações negativas observadas em profundidades entre as frações granulométricas do solo e a RSP sugerem que as frações mais finas do solo (argila total e silte) juntamente a matéria orgânica associada aos minerais (COam) foram importantes e responsáveis pela maior capacidade de armazenamento e retenção de água no solo e, conseqüentemente, redução da RSP, uma vez que foram verificados maiores valores da fração areia nestas camadas, valores superiores a 500 g kg⁻¹ de areia, fração do solo que proporciona maior percolação de água e baixa capacidade de armazenamento (MELO & ALLEONI, 2019). As classes texturais das amostras de solo nas diferentes profundidades (0 a 0,40 m) são apresentadas na Figura 3.



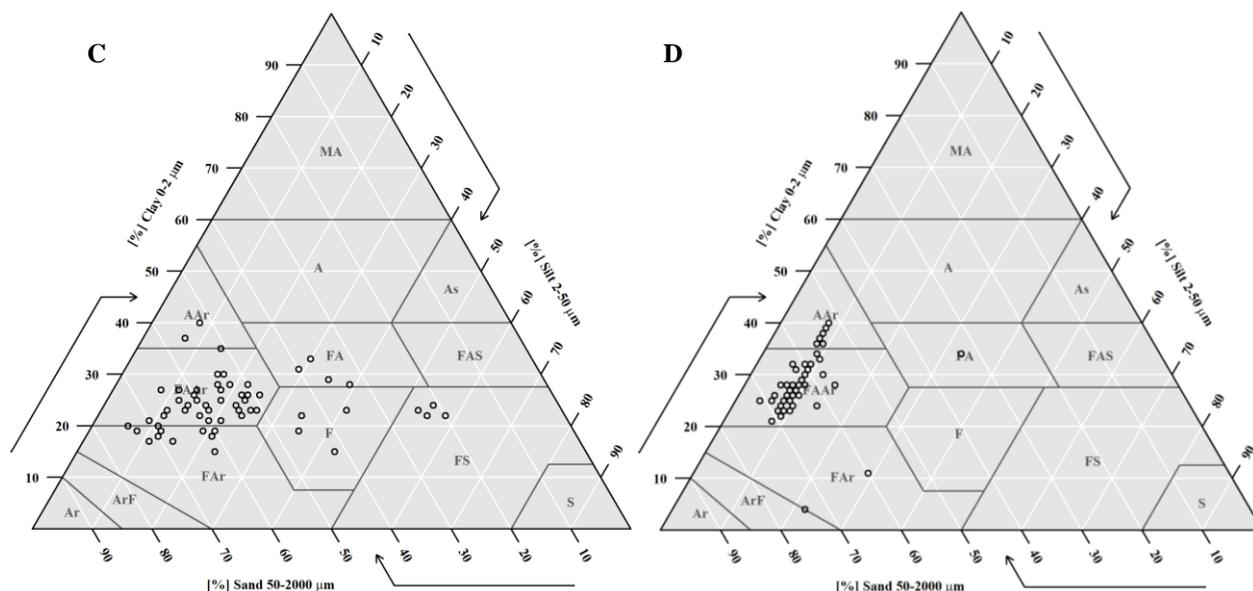


Figura 3. Classes texturais em 0-0,05 m (A), 0,05-0,10 m (B), 0,10-0,20 m (C) e em 0,20-0,40 m (D) de acordo com Santos et al. (2015). Ar: Areia; ArF: Areia franca; FAr: Francoarenosa; F: Franca; FAAr: Franco-argiloarenosa; FS: Francossiltosa; S: Silte; AAr: Argiloarenosa; FA: Francoargilosa; FAS: Franco-argilossiltosa; A: Argila; As: Argilossiltosa; MA: Muito argilosa.

Através da análise das frações granulométricas do solo na área experimental permitiu-se identificar que em todas as profundidades houve predomínio da textura média, sendo os solos mais recomendados para o cultivo da bananeira, pois extremos texturais são condições que limitam o crescimento de suas raízes (AGUIRRE et al., 2012). Nos pontos amostrais observaram-se as classes texturais franco-argiloarenosa, franco-arenosa e argiloarenosa, com frações de areia total em praticamente todos os pontos georreferenciados acima de 500 g kg^{-1} . Contudo, é interessante notar a variação de classes texturais entre os pontos de amostragem mesmo tratando-se de uma pequena área amostral.

Nos solos de textura mais arenosa (em superfície, Figuras 3A-C) verifica-se menor superfície específica e tendem a formar naturalmente estruturas no solo com fraca agregação se comparados aqueles com uma maior participação das frações argila e silte e o aumento da fração argila em subsuperfície devido translocação de argila corroborou com correlações negativas com a RSP (Tabela 2). Ou seja, quanto maior o teor da fração argila menores os valores de RSP, evidenciando que a alta RSP observada ocorre devido aos manejos realizados no bananal e condições de experimentação, uma vez que a pedogênese indica que na profundidade avaliada de até 0,40 m, naturalmente não deveria ser observados valores de RSP tão altos como verificados.

Os maiores teores médios de COT e COam na camada superficial quando comparadas às demais profundidades (Tabela 1) e a correlação negativa da RSP com o COam em 0,10-0,20 m (Tabela 3) indicam que estas frações estão contribuindo para menores valores de RSP, pois a MOS é condicionadora da estrutura, estabilidade de agregados, porosidade e densidade do solo (MELO; ALLEONI, 2019), que influi indiretamente na RSP. O COam é definido como a fração da MOS que interage com a superfície de partículas minerais, formando os complexos organominerais (MELO; ALLEONI, 2019), desta maneira a correlação negativa dos valores da RSP com o COam em subsuperfície é mais um indicador de que a compactação do solo pode estar interferindo em condições menos favoráveis aos íons na solução do solo e ao desenvolvimento das raízes.

As raízes da bananeira possuem dificuldade de penetração em solos compactados (FREIRE et al., 2013) e estas são as primeiras estruturas da planta a sentirem os efeitos da compactação do solo, pois além do impedimento do surgimento de novas raízes, no qual há a redução da absorção de água e nutrientes, as raízes gastam energia na penetração em solos resistentes. Estas condições e gastos energéticos podem influenciar em uma menor resposta de potencial produtivo da cultura na área experimental. De maneira geral, as correlações significativas entre os valores de RSP e atributos do solo sugerem efeitos nas interações organo-minerais e, conseqüentemente, prejuízos as bananeiras, sobretudo na camada de 0,10-0,20 m, devendo ser pensados em manejos que melhorem as condições edáficas do bananal.

A investigação da correlação espacial e inferência da RSP em profundidade no bananal foi realizada e os parâmetros ajustados dos semivariogramas podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros obtidos da modelagem dos semivariogramas a partir dos valores de RSP em cultivo da banana BRS Princesa

RSP (MPa)	Modelo	C ₀	C ₁	C	A (m)	GDE	\bar{ER}	S_{ER}	AIC
0,00 - 0,05 m	Esf	0,000	0,615	0,615	9,1	Forte	0,0092	1,0243	144,991
0,05 - 0,10 m	Esf	0,000	1,703	1,703	8,7	Forte	0,0122	1,0408	207,227
0,10 - 0,15 m	Esf	0,000	5,153	5,153	11,8	Forte	0,0287	1,0890	264,522
0,15 - 0,20 m	Esf	0,000	5,648	5,648	12,0	Forte	0,0235	1,0676	269,326
0,20 - 0,25 m	Esf	1,823	5,721	7,544	13,5	Forte	0,0071	1,1088	289,713
0,25 - 0,30 m	Gau	3,832	4,020	7,852	7,1	Moderado	0,0045	1,1077	294,617
0,30 - 0,35 m	Esf	2,739	3,742	6,481	13,6	Moderado	-0,0004	1,1641	284,759
0,35 - 0,40 m	Gau	4,262	2,477	6,776	8,6	Moderado	0,0069	1,1684	286,949

Modelo: Esf – esférico, Exp – exponencial, Gau – gaussiano; C₀: Efeito pepita; C₁: Contribuição; C: Patamar; A: Alcance; GDE: Grau de dependência espacial; \bar{ER} : Erro médio reduzido; S_{ER} : Desvio padrão do erro médio reduzido; AIC: Critério de informação de Akaike.

No estudo variográfico, os modelos para a RSP nas diferentes camadas foram ajustados em sua maioria ao modelo esférico, seguido do gaussiano. O método da Máxima Verossimilhança buscou diminuir os erros quadráticos provenientes dos modelos e juntamente à validação cruzada foi permitido estabelecer os melhores parâmetros de critério de informação de Akaike (AIC), erro médio absoluto e desvio padrão do erro médio absoluto, gerando modelos variográficos que melhor pudessem representar de forma real a distribuição espacial da RSP (Figura 4).

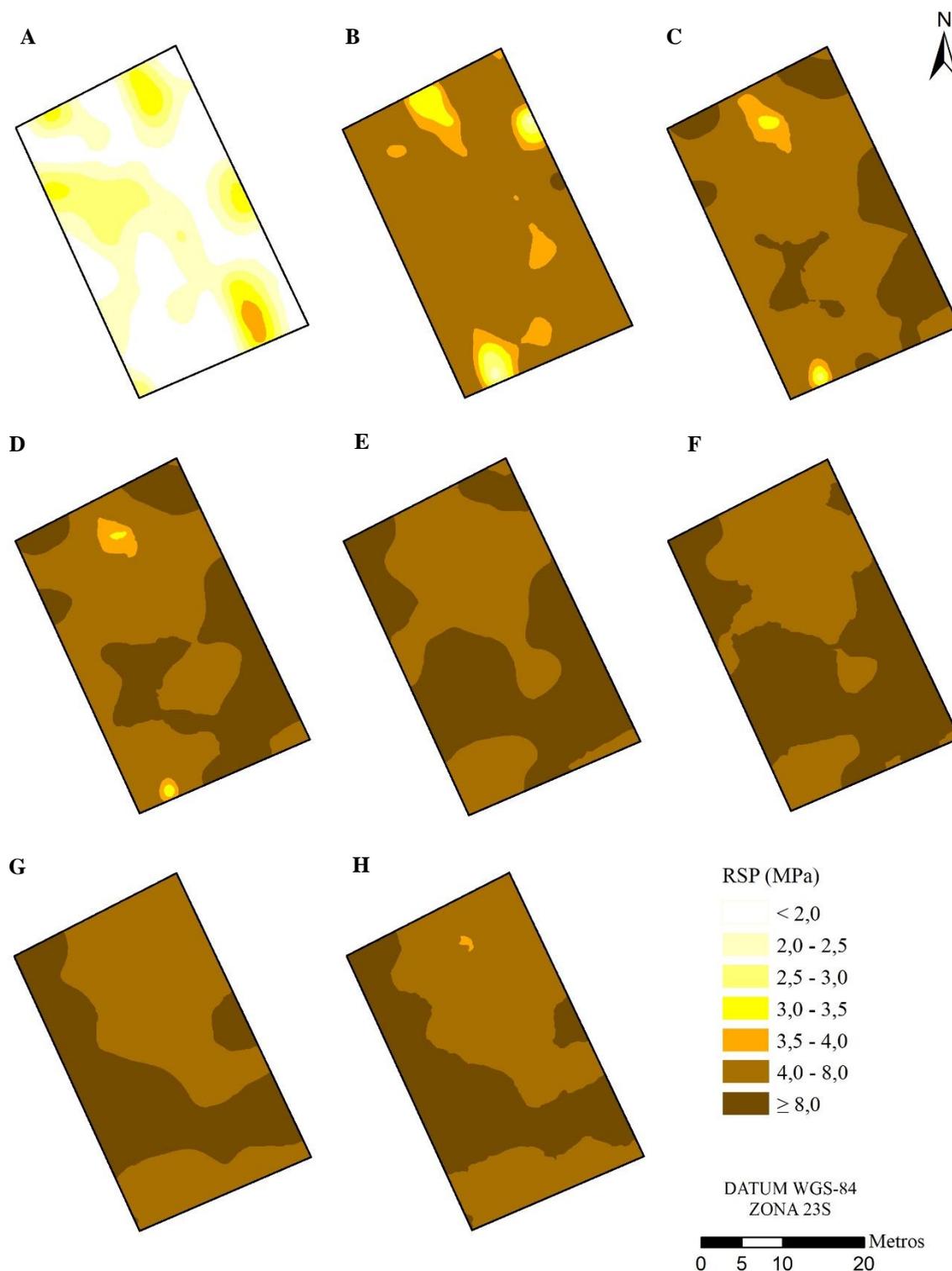


Figura 4. Distribuição espacial da RSP nas diferentes profundidades de solo em cultivo da bananeira BRS Princesa. RSP em 0-0,05 (A), 0,05-0,10 (B), 0,10-0,15 (C), 0,15-0,20 (D), 0,20-0,25 (E), 0,25-0,30 (F), 0,30-0,35 (G) e 0,35-0,40 (H) m.

Todas as variáveis apresentaram grau de dependência espacial forte segundo a classificação de Cambardella et al. (1994), exceto a RSP nas camadas 0,25-0,30, 0,30-0,35 e 0,35-0,40 m, para a qual verificaram-se valores de GDE classificados como moderado. Os

valores de alcance variaram de 7,1 m (camada 0,25-0,30 m) a 13,6 m (0,30-0,35 m), indicando as maiores distâncias no qual foram observadas correlações espaciais entre as amostras.

Na camada superficial (0-0,05 m, Figura 4A) observou-se menores valores de RSP e isso pode ser devido a decomposição de resíduos vegetais advindos de tratos culturais da banana (desbaste e desfolha) que são incorporadas na cobertura solo elevando a matéria orgânica (EMBRAPA, 2020a). O aumento de matéria orgânica em superfície é um dos principais responsáveis em minimizar os efeitos da pressão gerada sobre o solo (TIECHER, 2016) e é importante porque dissipa a energia que causa a compactação (ROSADO et al., 2012).

Há um aumento da RSP em subsuperfície, se intensificando nas camadas de 0,20-0,25 m (Figura 4E), com valores mínimo e máximo de 3,5 e 15,53 MPa, respectivamente, e em 0,25-0,30 (Figura 4F), em que são observados valores mínimo e máximo de 4,0 e 15,94 MPa, respectivamente. É importante mencionar que 30% das raízes da bananeira estão localizadas nas camadas de 0-0,10 m e cerca de 82% concentrada na camada de 0-0,50 m de profundidade, horizontalmente possuem de 1,0 a 2,0 m, podendo chegar até 5,0 m (TRINDADE et al., 2004), portanto os valores de RSP podem estar ligados e ser influenciados pela elevada quantidade de raízes presentes na área em estudo, pois uma grande quantidade de raízes pode aumentar a resistência de penetração em função do deslocamento do cone do penetrômetro (TIECHER, 2016). Desta maneira, deve-se ter atenção nos valores de RSP obtidos para evitar interpretações errôneas, uma vez que mesmo com elevados valores de RSP existem situações em que o estado de compactação dos solos não é limitante ao desenvolvimento da planta (TIECHER, 2016).

Através da análise das Figuras 4G e 4H verifica-se que os valores de RSP estão diminuindo e se dissipando em regiões das camadas 0,30-0,35 e 0,35-0,40 m, respectivamente, mas ainda exibem regiões no bananal com valores de RSP de 14,94 MPa, considerados muito altos e caracterizadas nos mapas a partir de manchas mais escuras. Os altos valores RSP verificados indicam que estes solos apresentam níveis de compactação que podem estar limitando o desenvolvimento da cultura da banana. Fatores como a pedogênese do solo podem estar relacionadas a observação destes valores, pois o acúmulo de argila iluviada em subsuperfície nos Argissolos, sobretudo em 0,20-0,40 m no bananal, induzem em um melhor ajuste destas partículas, reduzindo o espaço poroso e, conseqüentemente, influenciando na compactação do solo.

Atualmente o bananal apresenta vida útil de quase sete anos, sendo observada acentuada diminuição da produtividade nos últimos dois anos e recentemente não apresenta nenhuma produtividade. A suspensão do sistema de irrigação da área da bananeira, assim como a ocorrência de plantas daninhas, podem ser fatores que também contribuem no baixo potencial de produtividade apresentado pelo bananal.

Em vista de todas as condições no qual foram submetidas as avaliações da RSP no bananal - estação de inverno, pedogênese, heranças do preparo convencional na área experimental e falta de manutenção dos insumos agrícolas no solo - não foi possível estabelecer um limite crítico de RSP limitante ao desenvolvimento da cultura da banana. Existe a necessidade de obtenção de valores da RSP em diferentes condições climáticas e de umidades do solo para o estabelecimento dos limites críticos ao desenvolvimento das bananeiras. Entretanto observou-se que os valores de RSP foram altos o suficiente para indicar que existe uma limitação no crescimento das raízes e que estão interferindo na disponibilidade de nutrientes na solução do solo, pois apresentaram correlações significativas com a RSP a 5% de significância.

Como referências para uso na penetrometria, Silveira et al. (2010) sugerem como limites críticos os valores de RSP entre 2,0 e 2,5 MPa para a maioria dos vegetais. Segundo a Soil Survey Staff (1993) os valores da RSP podem ser classificados em baixo (RSP < 0,1 MPa), moderado (0,1 – 2,0 MPa), alto (2,0 – 4,0 MPa), muito alto (4,0 – 8,0 MPa) e extremamente alto (RSP > 8,0 MPa). Beutler et al. (2001) propuseram índices de RSP no qual a classificaram

como extremamente baixa ($< 0,01$ MPa), muito baixa ($0,01 - 0,1$ MPa), baixa ($0,1 - 1,0$ MPa), moderada ($1,0 - 2,0$ MPa), alta ($2,0 - 4,0$ MPa), muito alta ($4,0 - 8,0$ MPa) e extremamente alta ($> 8,0$ MPa). Entretanto deve-se analisar as diferentes condições de experimentação e as culturas para estes intervalos serem considerados, podendo não ser os mesmos para áreas de pomares, sobretudo as áreas voltadas à bananicultura.

É interessante notar que os valores de RSP na camada de $0,10-0,20$ m demonstraram ser os mais limitantes nas interações da solução do solo (correlações significativas a 5%) e ao observar os mapas de variabilidade espacial destas camadas (Figuras 4C e 4D) percebeu-se que as regiões de maiores RSP se intensificaram e aumentaram nos mesmos locais até a camada de $0,20-0,25$ m (Figura 4E), havendo o desenvolvimento de regiões mais compactadas nesta profundidade (Figura 5).

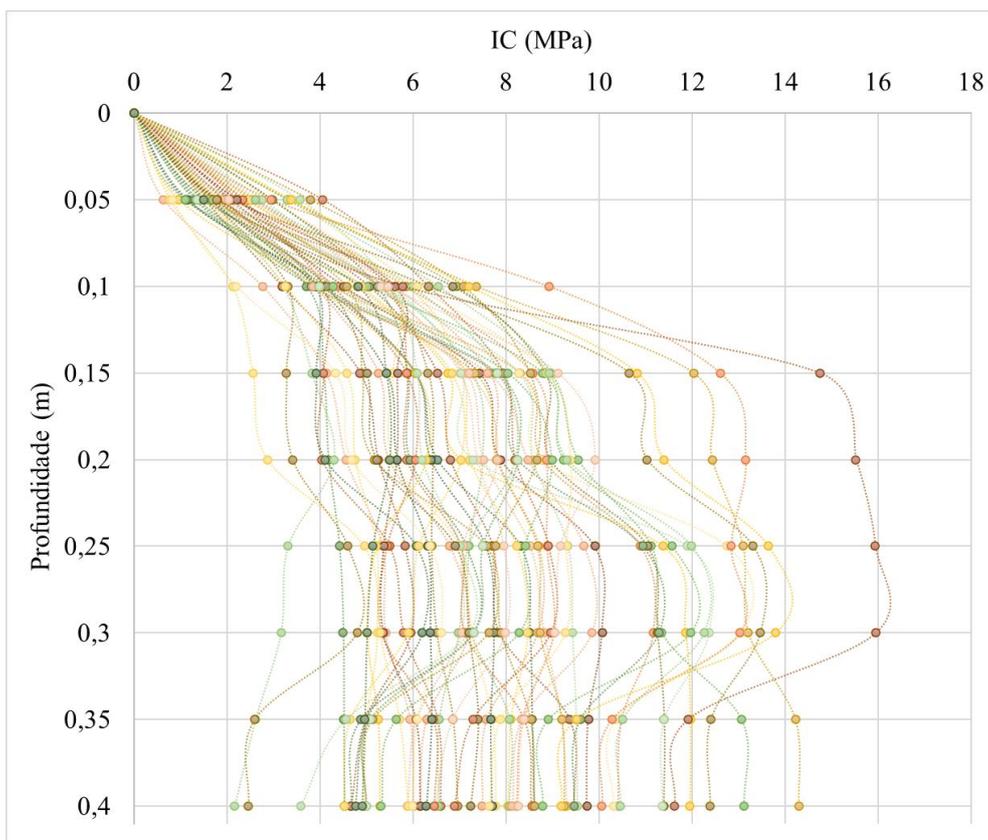


Figura 5. Índice de cone (IC) em função da profundidade do solo em cultivo da bananeira BRS Princesa, indicando acentuação da compactação em profundidade.

Pelas condições de experimentação e avaliando os limites críticos sugeridos pelos diversos autores foi possível afirmar que os valores de RSP iguais ou acima de $8,0$ MPa foram altos o suficiente para serem indicados manejos localizados a fim de diminuir a RSP no bananal, representada pelas regiões mais escuras dos mapas. Desta maneira, é recomendado que as bananeiras sejam seccionadas e espalhadas na área, para a incorporação de matéria orgânica, seguido de pousio. Após este período, poderá ser realizado o preparo de solo mecanizado indicando-se a subsolagem localizada em profundidade variada com a finalidade de descompactar o solo e gerar um novo bananal, considerando que a compactação não foi negativa em toda a área experimental (Figura 6).

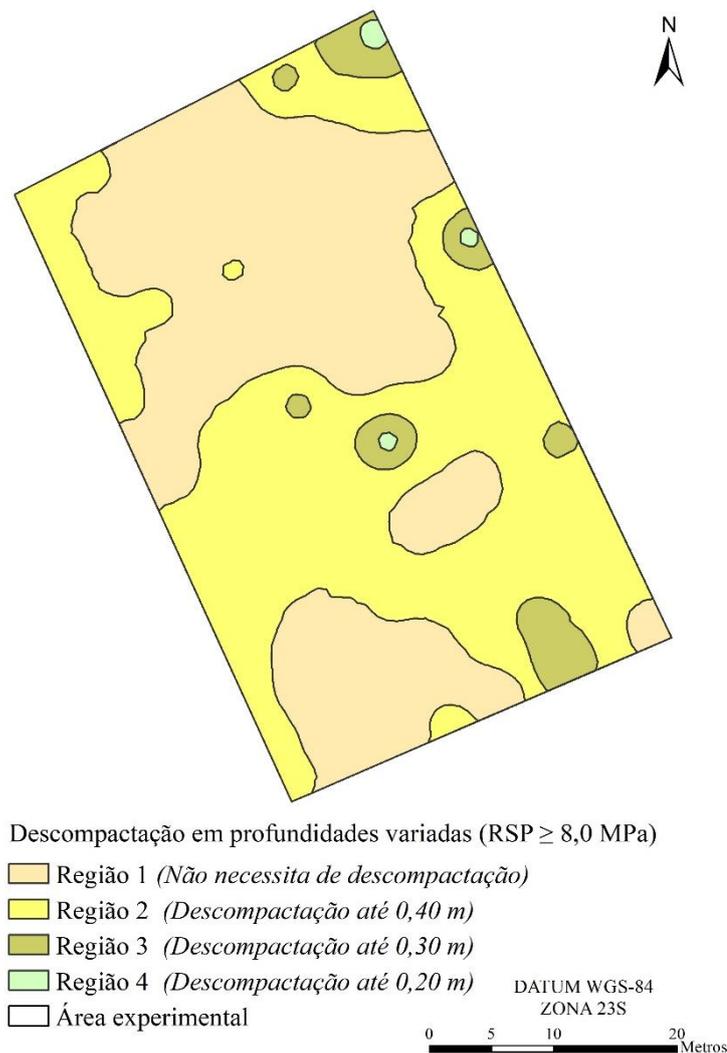


Figura 6. Mapa de variabilidade espacial da RSP maior ou igual a 8,0 MPa com a indicação de descompactação do solo a partir de subsolagem localizada em profundidade variada.

Dentre os locais amostrados, 40% dos pontos não apresentaram em profundidade valores de RSP maiores ou iguais a 8,0 MPa e ao realizar a estimação dos locais não amostrados a partir da krigagem ordinária foi possível inferir que 46,7% da área total do bananal não necessita de subsolagem, caracterizado na Figura 6 pela região 1. A subsolagem é indicada em três diferentes profundidades: 0 a 0,40 m, 0 a 0,30 m e 0 a 0,20 m, caracterizadas pelas regiões 2, 3 e 4 da Figura 6, respectivamente. Este tipo de manejo localizado é altamente importante, visto que poderá ser mobilizada somente as camadas compactadas, permitindo uma menor mobilização do solo, mantendo sua estrutura e a matéria orgânica protegida nos agregados e evitando desagregação excessiva (TIECHER, 2016; CORTEZ et al., 2020).

As regiões 2, 3 e 4 representam 48%, 4,9% e 0,4% da área total do bananal, respectivamente, isto indica que a subsolagem em profundidade variada e em regiões específicas representará um menor gasto de energia e consumo de combustível e menor emissão de carbono para a atmosfera quando essa prática é comparada ao método convencional. Este padrão foi observado em Machado et al. (2015) e Cortez et al. (2020), em que verificou-se redução de gastos a partir de subsolagem localizada e em profundidade variada. Nos estudos desenvolvidos por Cortez et al. (2020) foi definido o limite crítico de RSP como 4,0 MPa para cultivo de cana-de-açúcar, realizando-se diferentes subsolagem fixas e em profundidade variada

utilizando métodos geoestatísticos e de inferência espacial. Os autores notaram que a subsolagem em profundidade variada apresentou uma capacidade operacional 61,7% maior que a área total de operação em profundidade fixa e gerando uma economia de 57,1% no óleo diesel e em emissões de CO₂ equivalente.

A partir dos resultados obtidos e verificados na literatura, a gestão localizada para fins físicos em cultivos agrícolas são abordagens promissoras que podem promover a redução da compactação do solo, aumento do potencial produtivo, diminuição dos custos de preparo de solo e redução de danos ambientais. As tecnologias em bananais têm sido bastante exploradas recentemente (EMBRAPA, 2020b) e dentro da Agricultura de Precisão é um tópico totalmente significativo, visto que uma das estratégias de manejo estudadas é o cultivo de bananeiras em altas densidades, pois o primeiro ciclo apresenta alta produtividade, e eliminação e renovação do bananal a cada ano, tratando a cultura perene como anual (EMBRAPA, 2020c). A partir disto, os solos deverão oferecer condições ideais para os cultivos e, portanto, o manejo localizado do solo como os indicados neste trabalho pode oferecer respostas positivas tanto econômicas aos bananicultores quanto em conservação dos solos.

4 CONCLUSÕES

Os valores da RSP em profundidade avaliadas sugerem maior compactação em subsuperfície, sugerindo efeitos nas interações organo-minerais e, conseqüentemente, prejuízos as bananeiras, sobretudo na camada de 0,10-0,20 m. No estudo variográfico, os modelos para a RSP foram ajustados em sua maioria ao modelo esférico, seguido do gaussiano.

O preparo de solo mecanizado a partir de subsolagem localizada em profundidade variada foi indicado para as regiões do bananal que apresentaram valores de RSP iguais ou acima de 8,0 MPa. Verificou-se que 46,7% da área total do bananal não necessita de descompactação, indicando que a subsolagem em profundidade variada e em regiões específicas representará menor gasto energético e consumo de combustível e menor emissão de carbono para a atmosfera comparados a realização desta prática pelo método convencional.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, R. L. **Map locator of Rio de Janeiro's Seropédica city**, 2006. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RioDeJaneiro_Municip_Seropedica.svg (acesso em 20 out. 2020).

AGUIRRE, S. E.; PIRANEQUE, N. V.; MENJIVAR, J. C. Relación entre las propiedades edafoclimáticas y la incidencia de Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis* Morelet) en la zona bananera del Magdalena-Colombia. **Rev. Investig. Agrar. Ambient.**, v. 3, p. 13-25, 2012.

BATISTA, P. H. D.; MONTENEGRO, A. A. A.; ALMEIDA, G. L.P.; TAVARES, U. E.; RODRIGUES, R. A. S. Variabilidade espacial da resistência à penetração e teor de água em neossolo cultivado com banana no agreste pernambucano. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 27, n. 1, p. 54-60, 2019. <https://doi.org/10.13083/reveng.v27i1.881>.

BENGOUGH, A. G.; MULLINS, C. E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. **The Journal of Soil Science**, v. 41, p. 341–358, 1990. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1990.tb00070.x>.

BEUTLER, A. N.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; FERREIRA, M. M.; CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 167-177, 2001. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832001000100018>.

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**, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, p. 777-783, 1992. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x>.

CORTEZ, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PELUCO, R. G.; SIQUEIRA, D. S.; SIANSI, F. L.; BARBOSA, R. S.; FURLANI, C. E. A.; CAMARGO, L. A.; SILVA, L. S.; GOMES, R. P. Subsoiling of an oxisol at fixed and varying depth in áreas under sugarcane. **Precision Agriculture**, v. 21, p. 1351–1365, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09724-4>.

DAY, P. R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, v. 1, p. 545-556, 1965.

EMPRESA BRASILEIRA DE AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, 2020a. **Sistema Orgânico de Produção para a Cultura da Banana**: Práticas culturais e colheita. https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemasdeproducao16_1gal1ceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&p_r_p_-76293187_sistemaProducaoId=8018&p_r_p_-996514994_topicoId=10015 (acesso em 30 nov. 2020).

EMPRESA BRASILEIRA DE AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, 2020b. **Tecnologias para produção de banana na Amazônia é tema de live no canal Embrapa no Youtube**.

<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/53274265/tecnologias-para-producao-de-banana-na-amazonia-e-tema-de-live-no-canal-embrapa-no-youtube> (acesso em 01 dez. 2020).

EMPRESA BRASILEIRA DE AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, 2020c. **Banana: espaçamento e densidade.** https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia40/AG01/arvore/AG01_73_19122006104854.html (acesso em 30 nov. 2020).

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE INC – ESRI. **ArcGIS® 10.5:** New Release Transforms Enterprise GIS. Redlands, 2016.

FERNANDEZ, E. M.; CRUSCIOL, C. A. C.; THIMOTEO, C. M. S.; ROSOLEM, C. A. Matéria seca e nutrição da soja em razão da compactação do solo e adubação fosfatada. **Científica**, v. 23, n. 1, p. 117-132, 1995.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO, 2018. **Food Outlook:** Biannual Report on Global Food Markets – November 2018. <http://www.fao.org/3/CA2320EN/ca2320en.pdf> (acesso em 30 nov. 2020).

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO, 2020a. **Trade and markets:** Bananas. <http://www.fao.org/economic/est/est-commodities/bananas/en/> (acesso em 30 nov. 2020).

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO, 2020b. **Medium-term Outlook:** Prospects for global production and trade in bananas and tropical fruits 2019 to 2028. <http://www.fao.org/3/ca7568en/ca7568en.pdf> (acesso em 30 nov. 2020).

FURQUIM, L. C.; SOUZA, E. J.; SILVA, N. F.; NUÑEZ, D. N. C.; CABRAL, J. S. R.; SANTINI, J. M. K.; LEÃO, B. C. S.; STONE, L. F. Infiltração de água e resistência do solo à penetração em sistemas de cultivos integrados e em área de pastagem degradada. **Colloquium Agrariae**, v. 16, n. 5, p. 82-95, 2020. <http://dx.doi.org/10.5747/ca.2020.v16.n5.a397>.

FREIRE, L. R et al. **Manual de calagem e adubação do Estado do Rio de Janeiro**. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa; Seropédica, RJ: Editora Universidade Rural, 2013. 430 p.

GOOGLE. **Google Earth**, 2020. <https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/> (acesso em 01 ago. 2020).

GUIMARÃES, C. V.; ASSIS, R. L.; SIMON, G. A.; PIRES, F. R.; FERREIRA, R. L.; SANTOS, D. C. Desempenho de cultivares e híbridos de milho em solo submetido a compactação. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, vol. 17, n. 11, p. 1188-1194, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662013001100009>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS – IBGE, 2019. **Indicadores IBGE - Levantamento Sistemático da Produção Agrícola Estatística da Produção Agrícola/dezembro 2019.** https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/2415/epag_2019_dez.pdf (acesso em 20 nov. 2020).

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET, 2020. **INMET Tempo**. <https://tempo.inmet.gov.br/GraficosDiarios/A601> (acesso em 30 nov. 2020).

IORI, P.; DIAS JÚNIOR, M.S.; SILVA, R.B. Resistência do solo à penetração e ao cisalhamento em diversos usos do solo em áreas de preservação permanente. **Bioscience Journal**, v. 28, p. 185-95, 2012.

JIN, K.; SHEN, J.; ASHTON, R. W.; WHITE, R. P.; DODD, I. C.; PHILLIPS, A. L.; PARRY, M. A.; WHALLEY, W. R. The effect of impedance to root growth on plant architecture in wheat. **Plant Soil**, v. 392, p. 323–332, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2462-0>.

LANZA, T. R.; MACHADO, A.F.L.; MARTELLETO, L.A.P. Effect of planting densities of “BRS Princess” banana tree in the suppression of weeds. **Planta daninha**, vol. 35, e017162958, 2017. <https://doi.org/10.1590/s0100-83582017350100054>.

MACHADO, T. M.; LANÇAS, K. P.; FIORESE, D. A.; FERNANDES, B. B.; TESTA, J. V. P. Estimativa de gasto energético da operação de subsolagem em profundidades. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 11, p. 1121–1125. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n11p1121-1125>.

MATERECHERA, S. A.; DEXTER, A. R.; ALSTON, A. M. Penetration of very strong soils by seedling roots of different plant species. **Plant and Soil**, v. 135, p. 31–34. 1991. <https://doi.org/10.1007/BF00014776>.

MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. **Química e Mineralogia do Solo - Conceitos Básicos e Aplicações**. 3. reimp. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. único, 2019. 1381 p.

MIOTTI, A. A.; COSTA, M. C. G.; FERREIRA, T. O.; ROMERO, R. E. Profundidade e atributos físicos do solo e seus impactos nas raízes de bananeiras. **Rev. Bras. Frutic.**, v. 35, n. 2, p. 536-545, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-29452013000200024>.

NYÉKI, A.; MILICS, G.; KOVÁCS, A.J.; NEMÉNYI, M. Effects of Soil Compaction on Cereal Yield. **Cereal Research Communications**, v. 45, p. 1-22, 2017. <https://doi.org/10.1556/0806.44.2016.056>.

OLIVARES, B. O.; ARAYA-ALMAN, M.; ACEVEDO-OPAZO, C.; REY, J. C.; CAÑETE-SALINAS, P.; KURINA, F. G.; BALZARINI, M.; LOBO, D.; NAVAS-CORTÉS, J. A.; LANDA, B. B.; GÓMEZ, J. A. Relationship Between Soil Properties and Banana Productivity in the Two Main Cultivation Areas in Venezuela. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, p. 2512–2524, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00317-8>.

PATTISON, T.; SMITH, L.; MOODY, P.; ARMOUR, J.; BADCOCK, K.; COBON, J.; RASIAH, V.; LINDSAY, S.; GULINO, L. Banana root and soil health project - Australia. In: TURNER, D.W.; ROSALES, F.E. (eds). **Banana root system: towards a better understanding for its productive management**. Proceedings of an International Symposium International Network for the Improvement of Banana and Planta, 2005. p. 149-165.

REZENDE, J. O. **Consequências da aplicação de vinhaça sobre algumas propriedades físicas de um solo Aluvial (estudo de um caso)**. 112p. 1979. Tese (Doutorado em Agronomia

- Solos e Nutrição de Plantas). Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba.

RIBEIRO, M. A. V.; NOVAIS, R. F.; FAQUIN, V.; FERREIRA, M. M.; FURTINI NETO, A. E.; LIMA, J. M.; VILLANI, E. M. A. Resposta da soja e do eucalipto ao aumento da densidade do solo e a doses de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1157-1164, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000400015>.

ROSADO, T. L.; MONÇÃO, O. P.; GONTIJO, I.; PIRES, F. R. Efeito da cobertura vegetal nos atributos físicos de um Latossolo Amarelo cultivado com banana. **Enciclopédia Biosfera**, v. 8, p. 721-728, 2012.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

SANTOS, R. D. et al. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 7. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2015. 101 p.

SILVEIRA, D. C.; MELO FILHO, J. F.; SACRAMENTO, J. A. A. S.; SILVEIRA, E. C. P. Relação umidade versus resistência à penetração para um Argissolo Amarelo distrocoeso no Recôncavo da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 659-667, 2010.

SOIL SURVEY Staff. **Soil Survey Manual**. Washington: UsdaScs. U.S. Gov. Print. Office, p. 437, 1993.

STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V. L. **Recomendação para uso do penetrômetro de impacto, modelo IAA/Planalsucar – Stolf**. São Paulo: MIC/IAA/PNMCA – Planalsucar, 1983. 8p. (Série Penetrômetro de Impacto – Boletim, 1).

TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p.

TIECHER, T. (org.). **Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no Sul do Brasil: Práticas alternativas de manejo visando a conservação do solo e da água**. Porto Alegre: UFRGS. 186 p.

TRINDADE, A. V. et al. **O cultivo da bananeira**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura: 2004. 279 p.

VILLARREAL-NÚÑEZ, J.; PLA-SENTIS, I.; AGUDO-MARTÍNEZ, L.; VILLALÁZ-PÉREZ, J.; ROSALES, F.; POCASANGRE, L. Soil quality indexes in areas cultivated with banana in Panama. **Agronomía Mesoamericana**, v. 24, n. 2, p. 301-315, 2013. <http://dx.doi.org/10.15517/AM.V24I2.12530>.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.) **Applications of soil physics**. Academic press, 1980. p. 319–344.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. **A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil**. Communications in Soil Science and Plant Analysis, New York, v. 19, n. 13, p. 1467-1476, 1988.

CONCLUSÕES GERAIS

Através da análise da distribuição espacial dos atributos do solo na área de pastagem cultivada com a Tifton 85 e cultivo da banana BRS Princesa, ambas localizadas na região sudeste do Brasil, verifica-se que os manejos realizados, assim como os fatores de formação dos solos, são os responsáveis pela alta variabilidade espacial observada.

De maneira geral, das 99 variáveis do solo avaliadas pela geoestatística, 14 apresentaram efeito pepita puro, indicando aleatoriedade das amostras e a não possibilidade de mapeamento da variabilidade espacial, 49 atributos do solo apresentaram forte dependência espacial e 36 variáveis moderada espacialidade.

Na área cultivada com a Tifton 85 a distribuição espacial das frações da matéria orgânica do solo indicou maiores teores nas regiões de alta probabilidade de ocorrência de maiores produtividades da cultura. O mapeamento da necessidade de calagem em zonas homogêneas com aplicação de doses em teores médios ou à taxa variável indicou benefícios quando comparados à distribuição de calcário no solo em taxa fixa.

As relações espaciais entre os atributos do solo na área de cultivo da banana BRS Princesa indicaram a ocorrência de desbalanço nutricional no solo. Os valores da resistência do solo a penetração em profundidade sugerem maior compactação em subsuperfície, sendo indicada a descompactação do solo a partir de subsolagem localizada em profundidade variada. A partir deste padrão, observou-se que 46,7% da área total do bananal não necessita de descompactação.

A partir do estudo estatístico, geoestatístico e multivariado foi possível gerar duas zonas de manejos para as diferentes áreas experimentais para a recomendação de adubação. Verificou-se que o manejo localizado com a aplicação de adubação orgânica pode ser indicado, devendo ser aplicada maiores doses em uma zona de manejo específica, visto a maior necessidade de incremento de matéria orgânica no solo em determinados locais nas áreas experimentais. Este tipo de manejo contribuirá para a manutenção das frações orgânicas dos solos, gerando aumento da produtividade, e conseqüentemente maior retorno econômico para o agricultor.